

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DEL'ENSEIGNEMENTS SUPERIEURET DELARECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
جامعة 20 أوت-1955 سكيكدة  
UNIVERSITE 20 AOÛT 1955-SKIKDA



Faculté des Sciences  
Département des Sciences de la Nature et de la Vie Mémoire Présenté en Vue de  
l'Obtention du Diplôme de Master  
Filière Sciences Biologiques  
Option : Ecotoxicologie animale

## Intitulé

L'effet des nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub> sur le développement  
des larves des moustiques.

### Présente par :

- ✓ Bouaita Meriem
- ✓ GhammitKhawla
- ✓ SaadallahNourhane
- ✓ ChakalRayene

### Membres de Jury:

Dr. NadjiSafia (MCA)	Président	Univ.20 août 1955-Skikda
Dr. BoulaknfetFouzi (MCA)	Directeur de mémoire	Univ. 20 août 1955-Skikda
Dr. Benzazia Samia (MCA)	Examinatrice	Univ.20 août 1955-Skikda

Année universitaire:2024/2025

## *Remerciements*

Louanges et remerciements à **ALLAH**, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, le Donateur de toutes les bénédictions. Nous sommes profondément reconnaissants envers Allah de nous avoir guidés tout au long de nos années d'études et de nous avoir accordé la capacité, la clarté d'esprit et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail. Sa grâce et Sa guidance ont été notre lumière dans les moments de doute et d'incertitude.

Nous tenons tout d'abord

À remercier notre promoteur de mémoire, Dr . **BOULEKNAFET F**, d'avoir accepté d'encadrer ce travail, notamment pour ses qualités humaines et scientifiques. Nous lui sommes reconnaissants pour le temps qu'il nous a accordé, sa disponibilité et son amabilité tout au long de la réalisation de ce travail. Nous lui exprimons notre profonde gratitude et notre respect sincère.

À notre jury de soutenance d'avoir accepté de juger ce travail,

Dr.**BENZAZIA S**, nous vous remercions vivement pour l'honneur que vous nous avez fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire. Veuillez accepter l'expression de notre reconnaissance et notre profond respect.

Dr.**NADJI S**, c'est un grand honneur pour nous d'être dans notre jury. Nous sommes très reconnaissantes de l'amabilité avec laquelle vous avez accepté de juger notre travail. Permettez-nous, de vous exprimer nos remerciements les plus sincères.

Nos sincères remerciements et gratitude s'adressent à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation de licence et de master au sein de notre faculté.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans remercier tous les membres de nos familles et nos amis.

# DEDICACE

بسم الله الرحمن الرحيم،  
الحمد لله الذي أتمّ علينا نعمه، وأعاننا على بلوغ هذا الإنجاز.

أهدي هذا العمل إلى والديّ العزيزين،  
إلى أبي، معلمي الأول، الحاضر دائماً بنظرة المعطّنة وكلماته المشجعة.  
إلى أمي، التي رافقتني دعواتها الصامّة في عمق الليالي،  
شكراً لكما على حبكما غير المشروط، وعلى حضوركما الدائم، مصدر قوتي وثباتي.

إلى إخواني: خالد، زين الدين، عمّار، قاسم، ورؤوف،  
أنتم السند والكتف الذي لا يعيل.  
والى أبناء أخي: أسيد وأويس، بهجة أيامنا .  
والى شقيقات القلب: خلود و تسنيم .

إلى عائلتي كافة، من كبارها إلى صغارها،  
شكراً لدعواتكم الصادقة ومحبتكم النقيّة.

والى من كان دعمه هادئاً، ووجوده مشجعاً في مسيرتي العلمية  
هيشم، لك مني خالص الامتنان .

الى صديقاتي الوفيّات رفيقات الدرب : شكرا لكنّ على دعمكنّ ، بجهودكنّ أصبحت الرحلة أجمل .

والى كل من ترك بصمة إيجابية في طريقي،  
تقبّلوا مني أصدوح عبارات الشكر والامتنان



## Résumé

Dans un contexte de résistance croissante des moustiques aux insecticides conventionnels, cette étude vise à explorer une alternative innovante en évaluant l'effet larvicide des nanoparticules de Titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) sur les larves d'*Aedes detritus*, une espèce halophile présente dans les zones côtières.

Les larves ont subi un traitement par quatre concentrations (100, 300, 400 et 500  $\mu\text{g/mL}$ ), et la mortalité larvaire a été enregistrée à trois temps d'exposition : 24 h, 48 h et 72 h. Les résultats obtenus montrent une mortalité absente à la concentration de 100  $\mu\text{g/mL}$  et une augmentation significative à partir de 300  $\mu\text{g/mL}$ , avec un effet plateau partiel observé à 24 h et 48 h. Cependant, à 72 h, toutes les concentrations induisent une augmentation progressive et significative de la mortalité, indiquant un effet cumulatif des nanoparticules. Les analyses statistiques (ANOVA à un facteur et test post-hoc de Tukey) confirment la significativité des différences entre les groupes.

La modélisation sigmoïdale de la courbe dose-réponse a permis d'estimer les seuils de toxicité :  $\text{CL}_{25} = 311,9 \mu\text{g/mL}$ ,  $\text{CL}_{50} = 658,1 \mu\text{g/mL}$  et  $\text{CL}_{90} = 2930 \mu\text{g/mL}$ . Ces données confirment l'effet dose-dépendant et temporel du  $\text{BaTiO}_3$  sur les larves. Par ailleurs, les propriétés physico-chimiques de ce matériau, notamment sa faible solubilité et sa stabilité, suggèrent un mode d'action progressif par adsorption ou interférence électrochimique.

En conclusion, le Titanate de Baryum présente un potentiel intéressant en tant qu'agent larvicide alternatif, moins agressif que les nanoparticules métalliques classiques, mais efficace sur la durée. Il pourrait constituer une option prometteuse dans la lutte intégrée contre les vecteurs, sous réserve d'évaluations écotoxicologiques complémentaires.

**Mots-clés :** nanoparticules, Titanate de Baryum, *Aedes detritus*, mortalité larvaire, toxicité, ANOVA, dose-réponse.

## المخلص

في سياق المقاومة المتزايدة للبعوض تجاه المبيدات الحشرية التقليدية، تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف بديل مبتكر من خلال تقييم التأثير القاتل لليرقات لجزيئات النانو من تيتانات الباريوم ( $BaTiO_3$ ) على يرقات *Aedes detritus*، وهي نوع محب للملوحة يتواجد في المناطق الساحلية.

خضعت اليرقات للعلاج بأربع تراكيز (100، 300، 400 و 500 ميكروغرام/مل)، وتم تسجيل الوفيات بين اليرقات عند ثلاث فترات: 24 ساعة، 48 ساعة و 72 ساعة.

أظهرت النتائج عدم وجود وفيات عند التركيز 100 ميكروغرام/مل، وزيادة ملحوظة ابتداءً من 300 ميكروغرام/مل، مع ملاحظة تأثير ثابت جزئي عند 24 و 48 ساعة. ومع ذلك، عند 72 ساعة، سببت جميع التراكيز زيادة تدريجية وملحوظة في الوفيات، مما يشير إلى تأثير تراكمي للجزيئات النانوية.

تؤكد التحليلات الإحصائية (ANOVA واختبار Tukey) معنى الفروقات بين المجموعات.

سمحت النمذجة السيمغودية لمنحنى الجرعة-الاستجابة بتقدير حدود السمية:  $CL_{25} = 311.9$  ميكروغرام/مل،  $CL_{50} = 658.1$  ميكروغرام/مل و  $CL_{90} = 2930$  ميكروغرام/مل. تؤكد هذه البيانات وجود تأثير يعتمد على الجرعة والوقت لجزيئات  $BaTiO_3$  على اليرقات.

علاوة على ذلك، تشير الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه المادة، ولا سيما ذوبانها المنخفض واستقرارها، إلى آلية عمل تدريجية من خلال الامتصاص أو التداخل الكهروكيميائي.

في الأخير، يُظهر تيتانات الباريوم إمكانات واعدة كعامل قاتل لليرقات كبديل أقل عدوانية من الجزيئات المعدنية النانوية التقليدية، لكنه فعال على المدى الطويل. وقد يمثل خيارًا واعدًا في مكافحة المتكاملة للناقلات، رهناً بمزيد من التقييمات البيئية

**الكلمات المفتاحية:** تيتانات الباريوم، الجزيئات النانوية، *Aedes detritus*، الوفيات، السمية، منحنى ANOVA، الجرعة-الاستجابة.

## Abstract

In the context of the increasing resistance of mosquitoes to conventional insecticides, this study aims to explore an innovative alternative by evaluating the larvicidal effect of Barium Titanate ( $\text{BaTiO}_3$ ) nanoparticles on the larvae of *Aedes detritus*, a halophilic species found in coastal areas.

The larvae were treated with four concentrations (100, 300, 400, and 500  $\mu\text{g/mL}$ ), and larval mortality was recorded at three exposure times: 24 h, 48 h, and 72 h.

The results showed no mortality at the concentration of 100  $\mu\text{g/mL}$  and a significant increase starting from 300  $\mu\text{g/mL}$ , with a partial plateau effect observed at 24 h and 48 h. However, at 72 h, all concentrations induced a progressive and significant increase in mortality, indicating a cumulative effect of the nanoparticles.

Statistical analyses (one-way ANOVA and Tukey post-hoc test) confirmed the significance of the differences between the groups.

The sigmoidal modeling of the dose–response curve allowed the estimation of toxicity thresholds:  $\text{LC}_{25} = 311.9 \mu\text{g/mL}$ ,  $\text{LC}_{50} = 658.1 \mu\text{g/mL}$ , and  $\text{LC}_{90} = 2930 \mu\text{g/mL}$ . These data confirm the dose- and time-dependent effect of  $\text{BaTiO}_3$  on the larvae.

Furthermore, the physicochemical properties of this material, particularly its low solubility and stability, suggest a gradual mode of action through adsorption or electrochemical interference.

In conclusion, Barium Titanate shows promising potential as an alternative larvicidal agent, less aggressive than conventional metallic nanoparticles, yet effective over time. It could represent a promising option in integrated vector management, subject to further ecotoxicological evaluations.

**Keywords:** nanoparticles, Barium Titanate, *Aedes detritus*, larval mortality, toxicity, ANOVA, dose–response.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b> .....	7
<b>Figure 2 :</b> .....	8
<b>Figure 3 :</b> .....	9
<b>Figure 4 :</b> .....	9
<b>Figure 5 :</b> .....	10
<b>Figure 6 :</b> .....	15
<b>Figure 7 :</b> .....	22
<b>Figure 8 :</b> .....	23
<b>Figure 9 :</b> .....	25
<b>Figure 10 :</b> .....	25
<b>Figure 11 :</b> .....	26
<b>Figure 12 :</b> .....	27
<b>Figure 13 :</b> .....	27
<b>Figure 14 :</b> .....	28
<b>Figure 15 :</b> .....	30
<b>Figure 16 :</b> .....	31
<b>Figure 17 :</b> .....	32
<b>Figure 18 :</b> .....	33
<b>Figure 19 :</b> .....	35
<b>Figure 20 :</b> .....	36
<b>Figure 21 :</b> .....	37
<b>Figure 22 :</b> .....	38
<b>Figure 23 :</b> .....	39

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 :</b> .....	7
<b>Tableau 2 :</b> .....	16
<b>Tableau 3 :</b> .....	24
<b>Tableau 4 :</b> .....	24
<b>Tableau 5 :</b> .....	31
<b>Tableau 6 :</b> .....	33
<b>Tableau 7 :</b> .....	33
<b>Tableau 8 :</b> .....	34

## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACE.....	
RESUMÉ.....	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
INTRODUCTION .....	1
SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
Chapitre I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
1.Rappel sur les culicidae.....	6
1.1    Modèle biologique.....	6
1.1.1    Position systématique.....	7
1.1.2    Habitat.....	8
1.1.3    Le cycle biologique d' <i>Aedes detritus</i> .....	8
1.1.4    Les stades lavaires.....	9
□ Œufs.....	9
□ Larves.....	9
□ Nymphes.....	10
□ Adultes.....	10
1.1.5    La bio-ecologie des moustiques.....	10
1.1.6    Importance médicale et épidémiologique des moustiques.....	11
1.1.7    Les facteurs influencent leur développement.....	13
2.Définition et propriété des nanoparticules .....	14
2.1    I.2.1.Définition des nanoparticules .....	14
2.2    Propriétés des nanoparticules .....	14
2.2.1    Surface spécifique élevée.....	14
2.2.2    Effets quantiques.....	14
2.2.3    Capacité de pénétration.....	15

2.2.4	Formation de la couronne protéique.....	15
2.2.5	Diversité de composition.....	15
3.	Structure cristalline .....	15
3.1	Propriétés physico-chimiques .....	16
3.2	Propriétés ferroélectriques.....	16
4.	Application des nanoparticules en entomologie.....	16
5.	Mécanismes d'action des nanoparticules sur les organismes vivants .....	17
5.1	Internalisation cellulaire .....	17
5.2	Trafic intracellulaire et accumulation.....	17
6.	Applications pertinentes au contexte expérimental.....	18
6.1	Application en lutte antivectorielle .....	18
6.2	Applications biologiques associées .....	18
PARTIE EXPÉRIMENTALE.....		19
Chapitre II : Matériel et méthodes.....		20
7.	Matériel et méthodes .....	21
7.1	Échantillonnage des larves de culicidae sur le terrain.....	21
7.2	Montage et identification des larves.....	22
7.3	Elevage des moustiques .....	22
7.4	Préparation des nanoparticules de BaTiO <sub>3</sub> .....	23
<input type="checkbox"/>	Sels fondus (molten salt).....	23
<input type="checkbox"/>	Rôle des sels fondus .....	23
<input type="checkbox"/>	Avantages des sels fondus .....	24
<input type="checkbox"/>	Précurseurs utilisés (matières premières).....	24
7.5	Préparation des concentrations et traitement des larves par Nanoparticules BaTiO <sub>3</sub>	26
7.5.1	Préparation de solution stock de BaTiO <sub>3</sub> .....	26
7.5.2	Réalisation du test de toxicité.....	27

7.6	Analyse statistique.....	28
Chapitre III: Résultats & discussion.....		29
8.	Résultats .....	30
8.1	Caractérisation du composés BaTiO <sub>3</sub> synthétisées par la méthode hydrothermal assistée par microonde. ....	30
8.1.1	Diffraction des rayons X (XRD) .....	30
8.1.2	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR).....	31
8.2	Identification morphologique de l'espèce étudiée .....	32
8.3	Effets larviques du BaTiO <sub>3</sub> sur A.detritus .....	33
8.3.1	Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet larvicide de BaTiO <sub>3</sub> .....	33
8.3.2	Test Tukey .....	35
8.3.3	Modélisation dose-réponse.....	38
8.4	Observation histologique.....	39
III.2.	Discussion .....	40
Conclusion.....		42

## Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

ANOVA : Analyse de la variance

ATP : Adénosine triphosphate

BaTiO<sub>3</sub> : Titanate de baryum

CL<sub>50</sub> : Concentration létale pour 50 % des individus testés

CL<sub>90</sub> : Concentration létale pour 90 % des individus testés

DNA : Deoxyribonucleic Acid (ADN)

DF : Degrés de liberté

EC<sub>25</sub> : Concentration efficace pour 25 % des individus

EC<sub>50</sub> : Concentration efficace pour 50 % des individus

EC<sub>90</sub> : Concentration efficace pour 90 % des individus

EPA : Environmental Protection Agency

H&E : Hématoxyline-Éosine

IC<sub>50</sub> : Concentration inhibitrice à 50 %

L1 à L4 : Stades larvaires 1 à 4 chez les moustiques

MCORR : Mortalité corrigée

mg/L : Milligramme par litre

µg/mL : Microgramme par millilitre

NP : Nanoparticule

NPs : Nanoparticules

OECD : Organisation de coopération et de développement économiques

pH : Potentiel hydrogène

P : Valeur de probabilité (p-value)

R<sup>2</sup> : Coefficient de détermination

ROS : Espèces réactives de l'oxygène (Reactive Oxygen Species)

SD : Écart type (Standard Deviation)

SE : Erreur standard (Standard Error)

SPSS : Statistical Package for the Social Sciences

Tukey HSD : Honest Significant Difference (test de Tukey)

TiO<sub>2</sub> : Dioxyde de titane

UV : Ultraviolet

WHO : World Health Organization (Organisation mondiale de la santé)

XRD : Diffraction des rayons X

ZnO : Oxyde de zinc

---

# **INTRODUCTION**

---

## INTRODUCTION

Les insectes constituent sans conteste l'un des vecteurs biologiques les plus étudiés et redoutés à l'échelle mondiale, en raison de leur rôle majeur dans la transmission de nombreuses maladies infectieuses qui affectent gravement la santé publique. Ils sont responsables de plus de 17 % des maladies infectieuses humaines, ce qui représente un fardeau sanitaire considérable, notamment dans les régions tropicales et subtropicales où les conditions climatiques favorisent leur prolifération et leur activité (Soltani, 2015). Parmi les pathologies les plus graves transmises par ces insectes figurent le paludisme, la dengue, la schistosomiase, la trypanosomiase humaine africaine, la leishmaniose, la fièvre jaune, l'encéphalite japonaise et l'onchocercose, maladies qui continuent de provoquer chaque année des millions de cas et un nombre élevé de décès à l'échelle mondiale (Harwood & James, 1979 ; WHO, 2024). La complexité épidémiologique de ces maladies, associée à la diversité des espèces des insectes vecteurs, rend indispensable la mise en œuvre de stratégies de lutte antivectorielle adaptées, efficaces et durables (WHO,2020).

Il existe environ 3 450 espèces de moustiques. Les trois premiers stades de vie (œuf, larve, nymphe) sont aquatiques, le stade adulte (imago), qui vit d'une à douze semaines, évolue dans le milieu aérien. Leur biologie est ici abordée. Les moustiques sont parfois simplement nuisants, mais, surtout en zone intertropicale, ils sont vecteurs de parasitoses ou d'arboviroses. Leur impact sur la Santé publique humaine est considérable (Becker et al. ,2010).

Trois genres constituent les principaux vecteurs : *Anopheles*, *Aedes* et *Culex*. Certains aspects morphologiques permettant de les différencier assez aisément sont ici décrits. Les anophèles transmettent le paludisme, des filaires et des arboviroses. Les *Aedes* et les *Culex* sont vecteurs de filaires et d'arboviroses. Vaccins ou traitements de ces maladies à transmission vectorielle sont parfois disponibles et efficaces. Toutefois, la meilleure prévention contre toutes ces maladies consiste à éviter la piqûre par la connaissance des périodes d'activité de chaque moustique et par l'utilisation de produits répulsifs ou insecticides (Robert & Hervy ,2000).

Traditionnellement, la lutte contre les moustiques s'est appuyée essentiellement sur l'utilisation d'insecticides chimiques de synthèse, qui ont permis des avancées importantes dans la réduction des populations vectorielles et la limitation de la transmission des maladies (Cassida & Quistad, 1998). Cependant, l'usage intensif et prolongé de ces substances a engendré des résistances chez plusieurs espèces de moustiques, compromettant gravement l'efficacité des campagnes de contrôle. Par ailleurs, ces insecticides ont souvent un impact négatif sur l'environnement, la faune non ciblée, ainsi que sur la santé humaine, soulevant des

préoccupations écologiques et sanitaires majeures (Boyer, 2006 ; Toma et *al.*, 2011). Face à ces limites, la recherche s'est orientée vers des alternatives plus respectueuses de l'environnement, notamment la lutte biologique reposant sur des agents naturels. Les métabolites secondaires végétaux (Boyer, 2006 ; Toma et *al.*, 2011)

Parallèlement, les avancées spectaculaires dans le domaine des nanotechnologies offrent aujourd'hui des perspectives novatrices pour la lutte antivectorielle. En écotoxicologie, la capacité d'un produit à cibler spécifiquement une espèce nuisible sans affecter les communautés non cibles (insectes aquatiques, crustacés, algues, etc.) constitue un critère de choix fondamental (Kahru & Dubourguier, 2010).

Les nanoparticules, en raison de leurs propriétés physico-chimiques uniques à l'échelle nanométrique (1 à 100 nm), présentent des modes d'action inédits et un potentiel larvicide élevé, ouvrant la voie à des stratégies plus ciblées et potentiellement plus efficaces (Isman, 2015). Plusieurs types de nanoparticules ont été explorés, notamment le Dioxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ ), l'Oxyde de Zinc ( $\text{ZnO}$ ), l'Argent (Ag) et plus récemment le Titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ), qui suscite un intérêt croissant en raison de ses propriétés diélectriques remarquables, de sa stabilité thermique et de sa capacité à induire des effets toxiques spécifiques sur les organismes cibles. De plus, une méthode innovante, écologique et reproductible de biosynthèse de nanoparticules de  $\text{BaTiO}_3$  a été mise au point, exploitant la bactérie *Lactobacillus sp.*, ce qui permet une production verte, économique et respectueuse de l'environnement, en phase avec les exigences actuelles de durabilité (Dupont & Martin, 2007).

Dans ce cadre, le présent mémoire s'attache à étudier de manière approfondie l'impact des nanoparticules de Titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) sur le développement des larves du moustique *Aedes detritus*, une espèce reconnue pour son rôle dans la transmission de plusieurs arboviroses (Doshi, M et *al.*, 2020). L'objectif principal est d'évaluer la toxicité de ces nanoparticules en mesurant leur effet sur le taux de mortalité larvaire, la durée du développement, ainsi que sur les comportements biologiques des larves. Une attention particulière sera portée à l'identification d'éventuelles anomalies morphologiques induites par l'exposition, afin de mieux comprendre les mécanismes d'action de ces nanoparticules. Les résultats obtenus seront confrontés aux données existantes sur l'utilisation des nanoparticules dans la lutte antivectorielle, dans le but d'évaluer le potentiel du  $\text{BaTiO}_3$  comme agent innovant,

efficace et écologiquement responsable dans les stratégies modernes de contrôle des moustiques vecteurs (Doshi, M *et al.*, 2020).

Cette approche s'inscrit dans une dynamique globale visant à développer des solutions antivectorielles durables, sélectives et à faible impact éco-toxicologique, répondant aux défis sanitaires et environnementaux majeurs posés par la prolifération des moustiques et la transmission des maladies infectieuses. Elle illustre la convergence entre innovations technologiques et exigences écologiques, ouvrant la voie à une lutte antivectorielle plus efficace et respectueuse des écosystèmes (Benelli *et al.* 2016).

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier présente un état de l'art sur les nanoparticules utilisées en lutte antivectorielle, avec un accent sur le BaTiO<sub>3</sub>. Le deuxième détaille la méthodologie de biosynthèse et les protocoles expérimentaux. Le troisième expose les résultats obtenus sur les larves d'*Aedes detritus*, et le quatrième propose une discussion critique des données en lien avec la littérature, en évaluant le potentiel du BaTiO<sub>3</sub> comme alternative écologique et innovante.

---

## **Synthèse bibliographique**

---

---

Chapitre I :

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

---

## 1 Rappel sur les culicidae

Les Culicidae, ou moustiques, sont une famille d'insectes appartenant à l'ordre des Diptères, caractérisés par une seule paire d'ailes membraneuses et un corps mince souvent orné d'écailles (Clements, 2000). Leur cycle de vie est holométabole, comprenant les stades œufs, larves, nymphes et adultes, les stades immatures étant aquatiques tandis que les adultes sont terrestres (Asloum, 2023). Les larves de la sous-famille des Culicinae possèdent un siphon respiratoire sur le huitième segment abdominal, contrairement aux Anophelinae qui respirent par des papilles anales (Becker et al., 2010). Les femelles adultes sont munies d'un rostre piqueur-suceur leur permettant de prélever du sang, indispensable à la maturation de leurs œufs (WHO, 2017). La famille Culicidae comprend plus de 3500 espèces réparties en plusieurs sous-familles, dont les plus connues sont les Culicinae et les Anophelinae, qui se distinguent par leur morphologie et leurs comportements. Ces moustiques sont des vecteurs majeurs de nombreuses maladies infectieuses humaines et animales, ce qui en fait un groupe d'importance médicale et vétérinaire (Asloum, 2023).

### 1.1 Modèle biologique

*Aedes detritus* est une espèce de moustique halophile appartenant à la famille des Culicidae, principalement présente dans les zones littorales saumâtres et marécageuses (Hassaïne et al., 2015). Ce moustique est actif surtout en extérieur durant la journée avec un pic d'activité en soirée, et il attaque volontiers divers mammifères, y compris l'homme (Cornet & Brunhes, 1994). Les femelles pondent leurs œufs dans des flaques d'eau saumâtre temporaires, souvent riches en matière organique, où les larves se développent en quatre stades avant la nymphose (Cornet & Brunhes, 1994 ; Metge & Hassaïne, 1998). Morphologiquement, l'espèce se caractérise par une taille moyenne de 7 à 11 mm, une coloration des écailles spécifique sur les ailes et le thorax, ainsi qu'une chétotaxie larvaire distincte qui facilite son identification (Schaffner et al., 2001). *A. detritus* est reconnu comme vecteur potentiel de plusieurs arbovirus et parasites, ce qui souligne son importance en santé publique et vétérinaire, notamment dans les zones humides côtières d'Algérie où il cohabite avec d'autres espèces halophiles telles qu'*Aedes caspius* (Hassaïne et al., 2015 ; Rachid Arroussi et al., 2021). Sa biologie multivoltine et son adaptation aux milieux saumâtres en font un modèle pertinent pour l'étude des moustiques halophiles dans le contexte méditerranéen (Metge & Hassaïne, 1998).



**Figure 1 :** *Aedes detritus* (Frank, 2013).

### 1.1.1 Position systématique

**Tableau 1:** classification mondiale de *Aedes detritus*. (haliday, 1833).

Rang taxonomique	Classification
Règne	Animalia
Sous-règne	Metazoa
Embranchement	Arthropoda
Sous-embranchement	Hexapoda
Classe	Insecta
Sous-classe	Pterygota
Infra-classe	Neoptera
Super-ordre	Endopterygota
Ordre	Diptera
Sous-ordre	Nematocera
Infra-ordre	Culicomorpha
Famille	Culicidae (Meigen, 1818)
Sous-famille	Culicinae
Tribu	Aedini
Genre	<i>Aedes</i>
Espèce	<i>Aedes detritus</i> (Haliday, 1833)

### 1.1.2 Habitat

L'habitat d'*A. detritus* est principalement constitué de zones humides temporaires ou semi-permanentes, souvent caractérisées par des eaux saumâtres à salines, avec une forte teneur en matière organique et une végétation halophile. Cette espèce se développe dans des milieux alcalins, moyennement minéralisés et bien oxygénés, préférant des eaux avec une salinité comprise entre 1 et 5 g/L de NaCl, mais elle peut aussi être trouvée dans des eaux plus ou moins salées (Mouchet, 2022). En Algérie, des études menées dans la région de Biskra ont montré que *A. detritus* est plus abondant durant les mois froids (hiver et printemps) et occupe des sites où les paramètres physico-chimiques de l'eau favorisent son développement, notamment des eaux saumâtres dans des dépressions inondables avec une végétation dense (Hassaine *et al.*, 2022). Cette espèce est également présente dans les zones côtières européennes où elle colonise des habitats similaires (ECDC, 2023).

### 1.1.3 Le cycle biologique d'*Aedes detritus*

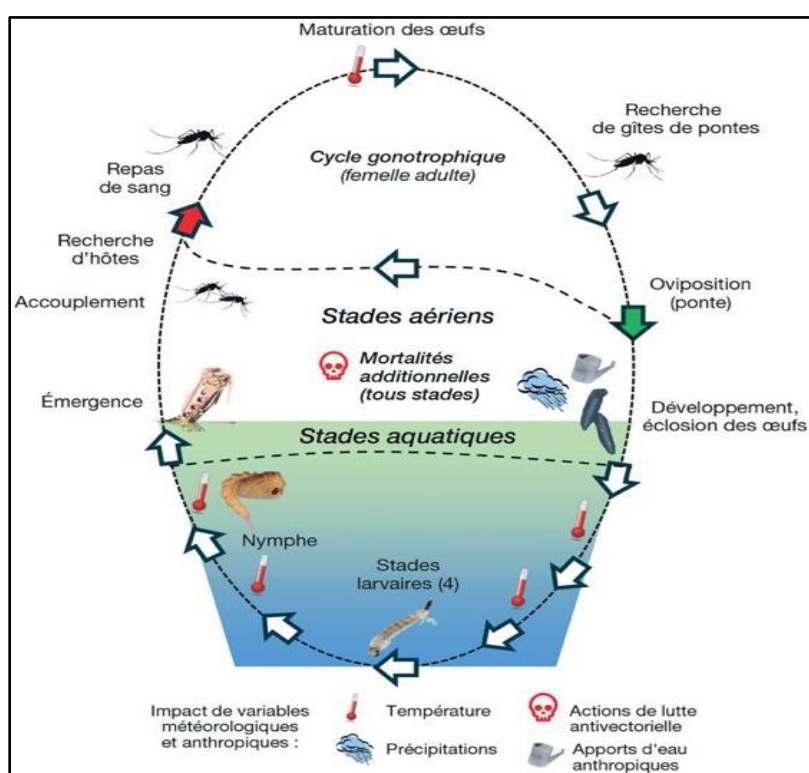
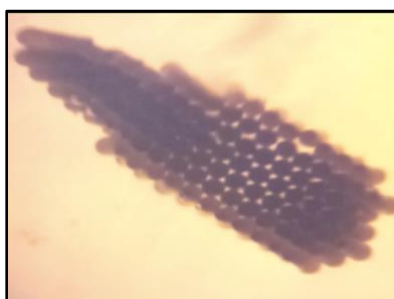


Figure 2 : Le cycle biologique d'*Aedes detritus* (Guégan & Mouchet, 2001).

### 1.1.4 Les stades larvaires

#### ❖ Œufs

Les œufs sont généralement fusiformes, recouverts d'une coque dure appelée chorion, qui présente une ornementation spécifique visible au fort grossissement. Cette coque protège l'œuf de la dessiccation et lui confère une rigidité (IRD, 2021). Fraîchement pondus, les œufs sont blancs puis se pigmentent en brun ou noir (IRD, 2021).



**Figure 3** :Les œufs (Kharoubi, 2021).

#### ❖ Larves

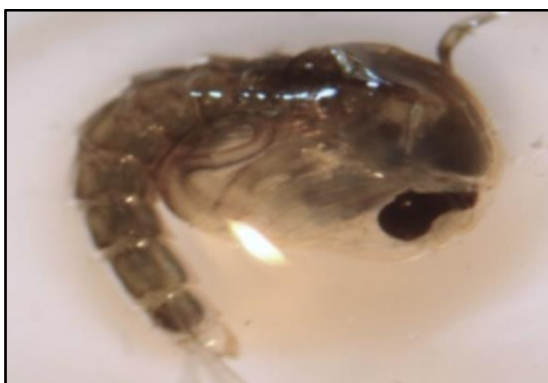
Les larves passent par quatre stades larvaires successifs, mesurant de l'ordre de 1 mm au premier stade jusqu'à 6-20 mm au quatrième stade selon les conditions (IRD, 2021). La larve est composée de trois parties distinctes : la tête, le thorax et l'abdomen. La tête est protégée par une capsule chitinisée, portant une paire d'antennes ornées de soies sensorielles. Le thorax porte des plaques chitinisées dorsales, ventrales et latérales, ainsi que trois paires de pattes articulées. L'abdomen comprend neuf segments visibles, dont le 8e porte des stigmates respiratoires et un peigne (pecten) caractéristique, important pour l'identification spécifique (IRD, 2021). Les soies et les plaques sur l'abdomen sont également utilisées en systématique (IRD, 2021).



**Figure 4** :Les larves (Kharoubi, 2021).

## ❖ Nymphes

Le stade nymphal est immobile et non nourricier, durant lequel la métamorphose s'opère. La nymphe est aquatique, avec un corps divisé en deux parties principales : le céphalothorax, portant les appendices alaires et les yeux, et l'abdomen segmenté. Les nymphes respirent à la surface de l'eau grâce à des siphons respiratoires (IRD, 2021).



**Figure 5 :** Les nymphes (Kharoubi, 2021).

## ❖ Adultes

L'adulte mesure environ 7 à 11 mm. Le corps est segmenté en tête, thorax et abdomen. La tête porte une paire d'yeux composés, une trompe allongée (proboscis) adaptée au piquage, et des antennes filiformes. Le thorax est robuste, portant une paire d'ailes membraneuses recouvertes d'écailles, ainsi que trois paires de pattes longues et fines. L'abdomen est segmenté et peut se dilater après un repas sanguin chez la femelle (IRD, 2021). La coloration générale est jaunâtre avec des écailles claires sur le thorax et les ailes, caractéristiques permettant son identification (Schaffner et *al.*, 2001).

### 1.1.5 La bio-écologie des moustiques

Les moustiques (famille Culicidae) présentent une bio-écologie complexe qui influence leur rôle de vecteurs. Leur reproduction suit un cycle gonotrophique en trois phases : recherche de l'hôte et prise du repas sanguin, digestion et maturation des œufs, puis recherche du site de ponte et ponte elle-même. Ce cycle varie selon les espèces et les conditions climatiques, se répétant plusieurs fois au cours de la vie de la femelle, ce qui détermine le nombre de pontes et le risque de transmission des agents pathogènes (Clements, 2012). L'alimentation des femelles se compose de sang, nécessaire à la maturation des œufs, et de jus sucrés pour l'énergie du vol, tandis que les mâles se nourrissent uniquement de sucres (Legros, 2014). La ponte a lieu dans

des gîtes aquatiques, souvent artificiels en milieu urbain, comme les récipients contenant de l'eau stagnante (Bagny, 2009). Le vol et la dispersion des femelles peuvent atteindre plusieurs kilomètres, facilitant la dissémination des moustiques et des maladies qu'ils véhiculent (Takken & Verhulst, 2013).

L'activité des moustiques est rythmée nyctémérament et saisonnièrement, avec des pics d'activité souvent au crépuscule ou la nuit, et varie selon les conditions climatiques locales (Clements, 2012). Pour survivre aux conditions défavorables, certains moustiques entrent en diapause, un état d'arrêt temporaire du développement, souvent au stade œuf ou adulte, déclenché par la photopériode et la température (Denlinger & Armbruster, 2014). Ces caractéristiques bioécologiques sont essentielles pour comprendre la transmission des maladies vectorielles en Algérie, où plusieurs espèces de Culicidae sont impliquées dans la diffusion de pathogènes humains et animaux (Nadji, 2002).

#### 1.1.6 Importance médicale et épidémiologique des moustiques

Les moustiques sont des insectes d'une importance capitale en santé publique mondiale, principalement en raison de leur rôle de vecteurs de nombreuses maladies infectieuses. Leur capacité à transmettre des agents pathogènes variés -parasites, virus et bactéries- par leurs piqûres constitue une menace majeure pour la santé humaine (WHO, 2017).

##### ➤ Inconvénients médical

Les moustiques sont responsables de la transmission de plusieurs maladies infectieuses majeures, qui affectent des millions de personnes chaque année et provoquent un nombre élevé de décès, particulièrement dans les pays en développement (WHO, 2020).

- **Le paludisme**

Cette maladie parasitaire est transmise par les moustiques femelles du genre *Anopheles*. Le parasite Plasmodium pénètre dans l'organisme humain lors de la piqûre, se développe dans le foie avant d'envahir les globules rouges, provoquant fièvre, anémie et complications graves. Le paludisme demeure l'une des maladies infectieuses les plus meurtrières, avec environ 247 millions de cas estimés et plus de 619 000 décès en 2021, principalement chez les enfants en Afrique subsaharienne (WHO, 2024). La lutte contre le paludisme repose sur la prévention des piqûres (moustiquaires imprégnées d'insecticide), le traitement médicamenteux et la lutte antivectorielle (WHO, 2024).

- **Les arboviroses**

Transmises principalement par les moustiques du genre *Aedes*, ces maladies virales regroupent la dengue, le chikungunya, la fièvre jaune et le virus Zika. La dengue est la plus répandue, avec une augmentation spectaculaire de son incidence ces dernières décennies. On estime que près de 3,9 milliards de personnes vivent dans des zones à risque de dengue, avec environ 96 millions de cas symptomatiques annuels (Gavi, 2024). Le chikungunya provoque des douleurs articulaires sévères pouvant persister plusieurs mois, tandis que le virus Zika est associé à des malformations congénitales graves lorsqu'il infecte les femmes enceintes. La fièvre jaune, quant à elle, peut entraîner des formes hémorragiques mortelles. La prévention repose sur la lutte contre les moustiques *Aedes* et la vaccination (Vidal, 2023).

- **Les filarioses**

Certaines espèces de moustiques, notamment du genre *Culex* et *Aedes*, transmettent des vers parasites responsables de filarioses lymphatiques, qui peuvent provoquer des œdèmes chroniques et invalidants (éléphantiasis). Ces maladies parasitaires sont particulièrement prévalentes dans les zones tropicales et subtropicales (Vidal, 2023). Cette diversité de maladies transmises par les moustiques souligne leur importance médicale majeure. Leur rôle de vecteurs est au cœur de la transmission de pathologies qui continuent de peser lourdement sur la santé mondiale (Vidal, 2023).

➤ **Importance épidémiologique**

Les moustiques sont présents sur presque toutes les terres émergées, à l'exception des régions polaires. Leur cycle biologique dépend de la présence d'eau stagnante, indispensable à la reproduction des larves. Cette caractéristique leur permet de coloniser une grande variété d'environnements, allant des zones rurales aux milieux urbains densément peuplés (Becker et al., 2020).

- **Distribution géographique et adaptation**

Les moustiques vecteurs sont largement distribués dans les régions tropicales et subtropicales, où les conditions climatiques chaudes et humides favorisent leur prolifération.

Cependant, des espèces comme *Aedes albopictus* (moustique tigre) ont démontré une remarquable capacité d'adaptation, s'implantant désormais dans des zones tempérées, notamment en Europe, en Amérique du Nord et dans certaines régions d'Afrique (Kraemer et al., 2015). Cette expansion géographique est facilitée par le commerce international, les transports et les changements environnementaux (Kraemer et al., 2015).

- **Transmission rapide et épidémies**

La piqûre infectante permet aux moustiques de transmettre rapidement des agents pathogènes d'un hôte à un autre, favorisant ainsi la survenue d'épidémies. La densité élevée de moustiques dans certaines zones, combinée à une forte densité humaine, augmente le risque de transmission et d'épidémies majeures, comme cela a été observé lors des flambées de dengue ou de chikungunya (Messina et al., 2019).

- **Facteurs influençant la dynamique épidémiologique**

Le changement climatique joue un rôle clé dans la modification de la répartition des moustiques et la durée de leur saison d'activité. L'augmentation des températures et les modifications des précipitations créent des conditions favorables à leur prolifération dans des régions auparavant non exposées. De plus, l'urbanisation rapide, souvent non planifiée, engendre la multiplication des sites de reproduction (eaux stagnantes dans les déchets, pneus usagés, réservoirs d'eau), augmentant la population de moustiques (CCNMI, 2022).

- **Surveillance et contrôle**

La surveillance entomologique est essentielle pour détecter l'apparition ou l'expansion de populations de moustiques vecteurs. Elle permet d'anticiper les risques épidémiologiques et de mettre en place des mesures de contrôle ciblées. La lutte antivectorielle combine des méthodes chimiques (insecticides), biologiques (larvicides, introduction de prédateurs) et environnementales. (Becker et al., 2020).

### 1.1.7 Les facteurs influencent leur développement

Les moustiques, vecteurs majeurs de maladies infectieuses, voient leur développement influencé par des facteurs climatiques, environnementaux et anthropiques. La température, en

modulant la vitesse de croissance et la survie des stades de développement, joue un rôle crucial, bien que des extrêmes thermiques puissent être létaux (Mordecai et *al.*, 2019 ; Reinhold, Lazzari & Lahondère, 2018). Les précipitations favorisent la formation des gîtes larvaires, tandis qu'une humidité élevée augmente la longévité et l'activité des adultes (Beck-Johnson et *al.*, 2017 ; Becker et *al.*, 2020). La disponibilité et la qualité des gîtes, influencées par l'environnement naturel et urbain, déterminent la réussite du cycle de vie, notamment pour des espèces comme *Aedes albopictus* (Kraemer et *al.*, 2015). La composition de l'eau et la densité larvaire affectent également le développement, en lien avec les ressources alimentaires et la présence de prédateurs (Alto & Juliano, 2001). Enfin, les activités humaines telles que l'urbanisation, la déforestation ou les pratiques agricoles amplifient les risques de prolifération, tandis que le changement climatique modifie la distribution des moustiques et étend les zones à risque de transmission vectorielle (Lounibos, 2002 ; Rocklöv & Dubrow, 2020).

## **2 Définition et propriété des nanoparticules**

### **2.1 I.2.1. Définition des nanoparticules**

Les nanoparticules sont des particules dont au moins une dimension est comprise entre 1 et 100 nanomètres (nm), ce qui les situe entre la taille des atomes et celle des cellules (Novethic, 2024). Cette échelle nanométrique confère à ces particules des propriétés physico-chimiques et biologiques uniques, différentes de celles des matériaux à l'état massif (Novethic, 2024). Elles peuvent être d'origine naturelle, accidentelle (fumée, érosion) ou synthétiques, fabriquées intentionnellement pour diverses applications (Novethic, 2024).

### **2.2 Propriétés des nanoparticules**

#### **2.2.1 Surface spécifique élevée**

Leur très petite taille implique un rapport surface/volume très important, ce qui augmente leur réactivité chimique et biologique (Novethic, 2024).

#### **2.2.2 Effets quantiques**

À cette échelle, les propriétés optiques, électriques et magnétiques peuvent changer drastiquement par rapport aux matériaux macroscopiques (Kittel, 2023).

### 2.2.3 Capacité de pénétration

Les nanoparticules peuvent traverser des barrières biologiques, telles que la peau ou les membranes cellulaires, ce qui les rend particulièrement intéressantes pour la médecine mais aussi potentiellement toxiques (INRS, 2024).

### 2.2.4 Formation de la couronne protéique

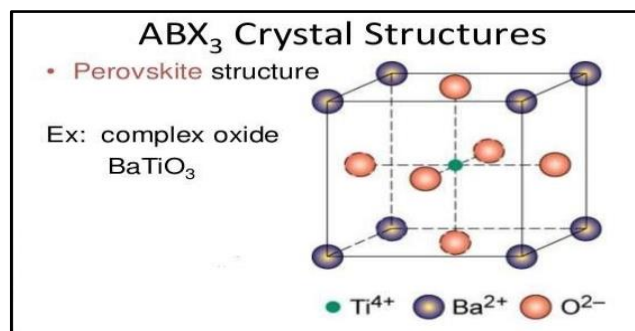
En milieu biologique, elles adsorbent rapidement des protéines à leur surface, modifiant leur comportement et leur interaction avec les cellules (Lundqvist et al., 2008).

### 2.2.5 Diversité de composition

Métaux, oxydes, polymères, lipides, ou composites, leur composition est adaptée à l'usage visé (Novethic, 2024).

## 3 Structure cristalline

- Type de réseau : Structure pérovskite (Xu et al., 2015)
- Phase cubique : À haute température ( $>130\text{ °C}$ ), groupe d'espace  $Pm\bar{3}m$  (Damjanovic, 1998)
- Phase tétragonale : À température ambiante (tP5), responsable de la polarisation (Damjanovic, 1998)
- Transitions de phase : Cubique  $\rightarrow$  Tétragonale ( $\sim 130\text{ °C}$ )  $\rightarrow$  Orthorhombique ( $\sim 0\text{ °C}$ )  $\rightarrow$  Rhomboédrique ( $< -90\text{ °C}$ )
- Formation octaédrique :  $\text{Ti}^{4+}$  entouré de six  $\text{O}^{2-}$  dans un octaèdre  $\text{TiO}_6$  (Benziada, 2018).



**Figure 6 :** Structure pérovskite de  $\text{BaTiO}_3$  (type  $\text{ABX}_3$ ) (Smith, 2015).

### 3.1 Propriétés physico-chimiques

**Tableau 2** : les propriétés physico-chimiques de BaTiO<sub>3</sub>.

Propriété	Valeur
Masse molaire	233,24 g/mol (Benziada, 2018)
Densité	~6,02 g/cm <sup>3</sup> (Benziada, 2018)
Température de fusion	~1650 °C (Benziada, 2018)
Solubilité	Insoluble dans l'eau, soluble dans HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Module d'Young	~67 GPa (Benziada, 2018)
Dureté (échelle de Mohs)	~5 (Benziada, 2018)
Constante piézoélectrique	~78 pC/N (Benziada, 2018)
Bande interdite (band gap)	~3,2–3,5 eV (Jaffe et al., 1971)
Indices de réfraction	n <sub>o</sub> = 2,412 ; n <sub>e</sub> = 2,360 (Hofmann et al., 2000)

### 3.2 Propriétés ferroélectriques

Le déplacement du cation Ti<sup>4+</sup> hors du centre de l'octaèdre TiO<sub>6</sub>, en dessous de la température de Curie, induit un moment dipolaire, rendant le matériau ferroélectrique. Ces propriétés sont exploitées pour la libération régulée de substances actives dans un milieu aquatique (Lines & Glass, 2001).

## 4 Application des nanoparticules en entomologie

Les nanoparticules métalliques, telles que celles d'Oxyde de Zinc (ZnO) et de d'Oxyde de Titane (TiO<sub>2</sub>), sont utilisées comme agents insecticides et larvicides grâce à leur petite taille et leur grande surface, qui leur permettent d'endommager les cellules des insectes via la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) (Obeizi, 2023). La synthèse verte de nanoparticules de ZnO à partir d'extraits végétaux montre une efficacité notable contre les larves de moustiques (Matalssi & Ghazzal, 2020).

Les nanoparticules renforcent également la lutte antivectorielle en améliorant la formulation des insecticides classiques, ce qui permet de réduire les doses utilisées et la toxicité environnementale. Par exemple, les nanoparticules d'argent et de zinc biosynthétisées augmentent l'activité insecticide contre des vecteurs comme *Aedes aegypti* et *Anopheles*

*spp*(Singh & Sultana, 2023). Elles peuvent aussi être fonctionnalisées pour cibler spécifiquement certaines espèces, limitant ainsi l'impact sur la biodiversité (Brahimi, 2022).

En surveillance entomologique, les nanoparticules sont intégrées dans des capteurs pour détecter rapidement la présence d'insectes nuisibles ou des pathogènes qu'ils transmettent, notamment via des biosenseurs à base d'or ou de graphène (Patel et *al.*, 2023).

En laboratoire, elles servent d'outils pour étudier les mécanismes biologiques chez les insectes, en suivant leur distribution intracellulaire ou en perturbant des voies métaboliques (Harsa, 2023).

Enfin, l'utilisation des nanoparticules ouvre des perspectives écologiques et sanitaires pour une lutte plus durable contre les insectes vecteurs, mais leur impact doit être évalué rigoureusement pour éviter des effets négatifs sur les écosystèmes (Obeizi, 2023 ; Matalssi & Ghazzal, 2020).

## 5 Mécanismes d'action des nanoparticules sur les organismes vivants

Parmi les mécanismes il y a :

### 5.1 Internalisation cellulaire

Les nanoparticules (NPs) sont principalement internalisées par les cellules via des mécanismes d'endocytose, un processus actif où la membrane plasmique enveloppe les particules pour les faire pénétrer dans des vésicules intracellulaires (Fayol et *al.*, 2012 ; Lartigue et *al.*, 2012). Selon leur taille et leur état d'agglomération, elles peuvent emprunter différentes voies d'endocytose, telles que :

- La phagocytose, surtout pour les particules de grande taille dans les cellules phagocytaires.
- La pinocytose, incluant la macropinocytose (vésicules > 1 µm) et l'endocytose médiée par la clathrine (vésicules ~120 nm) (Carrière, 2012).

Certaines nanoparticules très fines peuvent aussi diffuser directement à travers la membrane plasmique ou utiliser des transporteurs membranaires (Carrière, 2012).

### 5.2 Trafic intracellulaire et accumulation

Une fois internalisées, les nanoparticules sont transportées dans des compartiments endosomaux puis lysosomaux où elles peuvent être dégradées ou stockées (Fayol et *al.*, 2012). L'accumulation dans ces compartiments peut provoquer des perturbations cellulaires,

notamment par la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans un milieu acide, induisant un stress oxydatif (Carrière, 2012).

## **6 Applications pertinentes au contexte expérimental**

### **6.1 Application en lutte antivectorielle**

Le nano-BaTiO<sub>3</sub> est utilisé comme support pour la libération prolongée et contrôlée d'insecticides ou de répulsifs. Sa surface spécifique élevée à l'échelle nanométrique favorise l'adsorption et la diffusion régulée des agents larvicides dans les gîtes aquatiques. Cela permet d'optimiser la durée d'action tout en réduisant l'impact environnemental (Ghosh et *al.*, 2013).

### **6.2 Applications biologiques associées**

- Biocompatibilité : Adapté à des applications biomédicales, y compris les implants (Benziada, 2018).
- Stimulation cellulaire : Grâce à ses propriétés piézoélectriques, il peut favoriser la croissance tissulaire (Benziada, 2018).
- Capteurs biosensibles : Utilisé dans les dispositifs de détection de biomolécules pour le diagnostic rapide et la surveillance de pathogènes (Benziada, 2018).

---

# PARTIE EXPÉRIMENTALE

---

---

## Chapitre II : Matériel et méthodes

---

## 7 Matériel et méthodes

Notre étude expérimentale a été réalisée au niveau de l'animalerie du département des sciences de la nature et de vie à l'université de Skikda, elle s'est étalée de 10 avril au 14 juin 2025.

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'effet des nanoparticules de Titanate de Baryum ( $BaTiO_3$ ) sur le développement des larves de moustiques *Aedes detritus*. D'un point de vue pratique, notre travail consiste à observer leur taux de mortalité et les éventuelles malformations au cours de leur croissance. Cette approche nous permettra de déterminer si les nanoparticules de  $BaTiO_3$  ont un effet inhibiteur ou toxique sur le développement larvaire, et d'évaluer leur potentiel en tant qu'agent de lutte contre les moustiques vecteurs de maladies.

### 7.1 Échantillonnage des larves de culicidae sur le terrain

Des larves de moustiques ont été collectées dans différentes localités de la wilaya de Skikda : Béni Zid, Collo, Aghbal, ainsi que dans la zone proche de l'animalerie de l'Université de Skikda

L'échantillonnage des larves de moustiques (famille Culicidae) a été réalisé à l'aide de la méthode du « coup de louche » (*dipping*), selon le protocole décrit par Rioux et al. (1965). Cette méthode simple et efficace consiste à plonger un récipient calibré dans les gîtes larvaires pour recueillir les larves flottantes ou en suspension.

Le matériel utilisé comprend une louche d'un litre montée sur un manche en bois, permettant un accès facilité aux gîtes aquatiques. L'opérateur se positionne face au soleil pour améliorer la visibilité, reste immobile quelques secondes à environ un mètre du point de prélèvement afin de ne pas perturber les larves, puis plonge lentement la louche dans l'eau avant de la retirer avec précaution pour éviter les remous. Les larves récupérées sont ensuite comptées directement lors de l'écoulement de l'eau.

Dans les cas particuliers de gîtes profonds ou fermés (puits, citernes), des prélèvements successifs ont été réalisés à l'aide d'un seau de volume connu, afin d'obtenir un échantillon représentatif

## 7.2 Montage et identification des larves

Seules les larves de moustiques au quatrième stade larvaire (L4) ont été utilisées pour l'identification, ce stade étant le plus adapté à une détermination morphologique fiable grâce à la présence de caractères diagnostiques bien développés.

Après leur prélèvement, les larves ont été conservées dans de petits tubes en plastique étiquetés selon leur gîte d'origine, contenant de l'alcool éthylique à 70 %. Afin de permettre leur clarification, elles ont ensuite été placées dans une solution de potasse (KOH) à 10 % pendant 12 à 24 heures. Cette étape a été suivie d'une série de bains dans de l'alcool de concentration croissante (70 %, 90 %, puis 100 %) pour la déshydratation progressive. Les larves ont ensuite été immergées dans du créosote de hêtre pendant au moins une heure, en vue de leur montage.

Le montage microscopique a été réalisé entre lame et lamelle dans une goutte de baume du Canada. À l'aide d'une aiguille entomologique fine, chaque larve a été sectionnée au niveau du septième segment abdominal. La portion antérieure a été positionnée avec la face dorsale vers le haut, tandis que la partie postérieure a été disposée latéralement, permettant ainsi l'observation optimale des structures nécessaires à l'identification. L'identification taxonomique a été effectuée à l'aide du logiciel d'identification des moustiques méditerranéens développé (Brunhes et *al.*,1999).



**Figure 7** :L'identification morphologique.

## 7.3 Elevage des moustiques

Les larves identifiées ont été placées dans un bassin rempli d'eau, enrichie avec de la matière organique, puis introduites dans une cage grillagée pour leur élevage.

Après six (06) jours, les larves ont évolué jusqu'au stade adulte. Deux rats de souche

Wistar, acquis auprès de l'Institut Pasteur, ont été utilisés pour l'alimentation des femelles hématophages. Les mâles ont reçu une alimentation sucrée (solution sucrée + raisins secs). L'eau des larves a été renouvelée tous les deux jours avec contrôle régulier de la température et de l'oxygénation.



**Figure 8 :**Les gîtes de collecte les larves.

#### 7.4 Préparation des nanoparticules de $\text{BaTiO}_3$

La synthèse de la poudre de Titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) a été réalisée au sein du laboratoire de technologie des matériaux avancés de l'École National Polytechnique de Constantine (ENPC), selon la méthode des sels fondus, bien connue pour sa capacité à produire des poudres céramiques homogènes à température modérée.

##### ❖ Sels fondus (molten salt)

La synthèse par sels fondus est l'une des méthodes utilisées pour préparer des poudres céramiques. Elle consiste à utiliser un sel fondu comme milieu pour produire des oxydes complexes.

Le terme « sel fondu » désigne tout milieu ionique constitué d'anions et de cations issus de composés inorganiques, dans lequel des interactions électrostatiques fortes assurent la cohésion du liquide.

##### ❖ Rôle des sels fondus

- Accélérer la vitesse de réaction et abaisser la température de réaction.

- Améliorer le degré d'homogénéité (répartition uniforme des éléments constitutifs dans la solution solide).
- Contrôler la taille des particules.
- Contrôler la forme des particules.
- Contrôler l'état d'agglomération des poudres (Messing et *al.*, 1993).

#### ❖ Avantages des sels fondus

Dans cette méthode, les matériaux réactifs sont complètement dissous dans le sel fondu, ce qui permet d'obtenir un liquide plus homogène que celui préparé par réaction à l'état solide. Dans un sel fondu, les vitesses de diffusion entre les matériaux réactifs sont beaucoup plus élevées, ce qui rend la réaction relativement rapide. Ainsi, on peut obtenir des poudres à phase unique à une température plus basse (Zhou & Snyder, 1991). Cette méthode permet également de contrôler efficacement la morphologie des poudres (Messing et *al.*, 1993 ; Riman et *al.*, 1996).

#### ❖ Précurseurs utilisés (matières premières)

Lors de l'élaboration des céramiques, la préparation de la poudre nécessite une attention particulière à la distribution granulométrique et à l'homogénéité des composés. Pour la synthèse du BaTiO<sub>3</sub>, les précurseurs suivants ont été utilisés :

**Tableau 3 :**Précurseurs utilisés.

BaTiO <sub>3</sub>
barium hydroxide Ba (OH) <sub>2</sub> -8H <sub>2</sub> O
titanium oxide TiO <sub>2</sub>

**Tableau 4 :**Précurseurs communs.

potassium chloride KCl
sodium chloride NaCl
Methanol CH <sub>4</sub> O



Figure 9 : Précurseurs utilisés dans la synthèse.

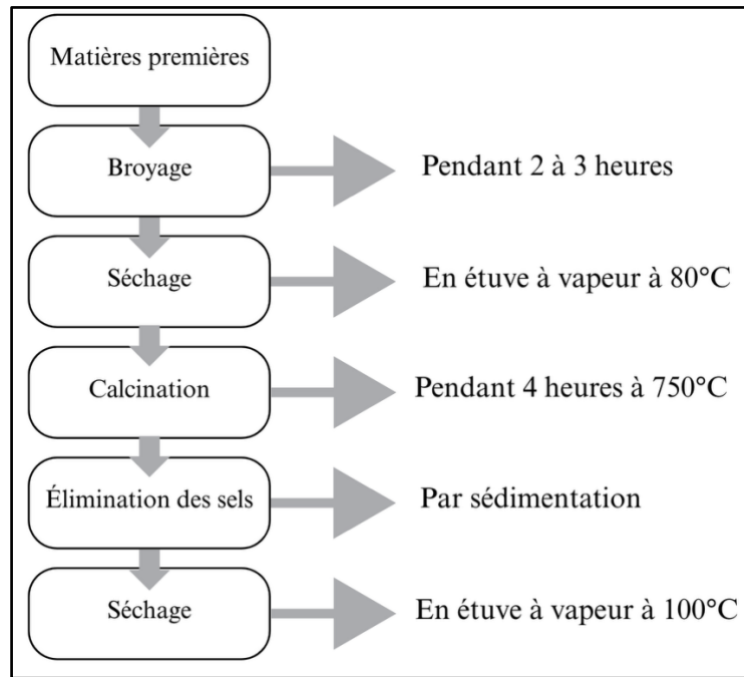
❖ Protocole de synthèse de la poudre

La poudre a été broyée pendant 10 minutes à une vitesse de 200 tours par minute, puis pendant 2 heures avec du méthanol, et enfin pendant 3 heures avec les sels par broyage planétaire à une vitesse de 150 tours par minute, afin d'obtenir un mélange très homogène.



Figure 10 :Broyage planétaire.

- Le mélange a été séché à 80 °C pendant 12 heures pour éliminer complètement le méthanol.
- La poudre obtenue a ensuite été calcinée pendant 4 heures à 750 °C.
- La dernière étape consiste à filtrer la poudre par sédimentation pour éliminer les sels ; l'absence de sels a été vérifiée à l'aide de nitrate d'argent.
- Enfin, la poudre a été séchée une nouvelle fois à 100 °C pendant 2 heures, puis broyée après séchage complet.



**Figure 11** :Les différentes étapes de la synthèse des poudres.

## 7.5 Préparation des concentrations et traitement des larves par Nanoparticules BaTiO<sub>3</sub>

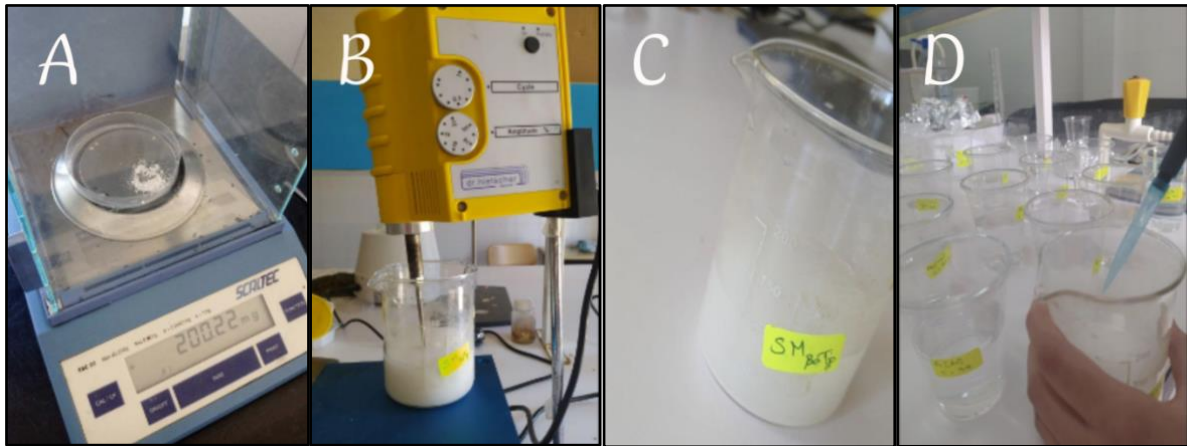
### 7.5.1 Préparation de solution stock de BaTiO<sub>3</sub>

Une solution mère de nanoparticules de Titanate de Baryum (BaTiO<sub>3</sub>) a été préparée à partir d'une poudre, à raison de 200 mg dissous dans 100 ml d'eau naturelle. La dispersion des particules a été homogénéisée à l'aide d'un sonicateur pendant 30 minutes.

À partir de cette solution, quatre concentrations finales ont été préparées : 100, 300, 400 et 500 µg/ml. Le volume nécessaire de la solution mère pour chaque concentration a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$VOLUME (L) = \frac{concentration\ souhaitée \times 100}{2000}$$

Chaque solution a été complétée avec de l'eau naturelle pour atteindre un volume final de 100 ml dans des gobelets de test. Ces solutions ont été fraîchement préparées avant chaque test pour assurer leur stabilité et éviter l'agglomération des nanoparticules.



**Figure 12 :** Étapes de préparation des solutions. A : masse de la quantité requise de  $\text{BaTiO}_3$ , B : dispersion des nanoparticules de  $\text{BaTiO}_3$ , C : la solution mère, D : préparation des concentrations par dilution de la solution mère.

### 7.5.2 Réalisation du test de toxicité

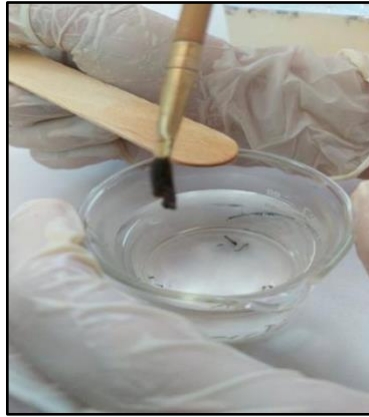
Des larves aux stades II et III ont été sélectionnées pour les tests. Les stades I ont été exclus en raison de leur taille, et les stades IV pour éviter leur transformation en stade nymphal.

Chaque concentration de nanoparticules (100, 300, 400, 500)  $\mu\text{g/ml}$  et gobelets pour témoins (contenant uniquement de l'eau naturelle sans nanoparticules et sans nourriture) ont été testées en triplicat ( $n = 3$ ). Ont également été préparés. Chaque gobelet a reçu 25 larves.



**Figure 13 :** Préparation des gobelets expérimentaux pour l'observation de l'effet de  $\text{BaTiO}_3$  sur les larves de moustiques.

La mortalité larvaire a été observée et enregistrée à 24 h, 48 h et 72 h après l'exposition. Une larve a été considérée comme morte si elle ne répondait pas au toucher (avec une micropipette ou une pince fine). Si la mortalité dans les témoins dépassait 10 %, le test devait être invalidé. Le cas échéant, une correction de la mortalité a été envisagée à l'aide de la formule d'Abbott.



**Figure 14** : Observation des mortalités.

## **7.6 Analyse statistique**

L'analyse statistique a été réalisée à deux logiciels ont été utilisés : GraphPad Prism 6 pour le calcul des concentrations létales, et Minitab 17 pour l'analyse de la variance

## **Chapitre III : Résultats & discussion**

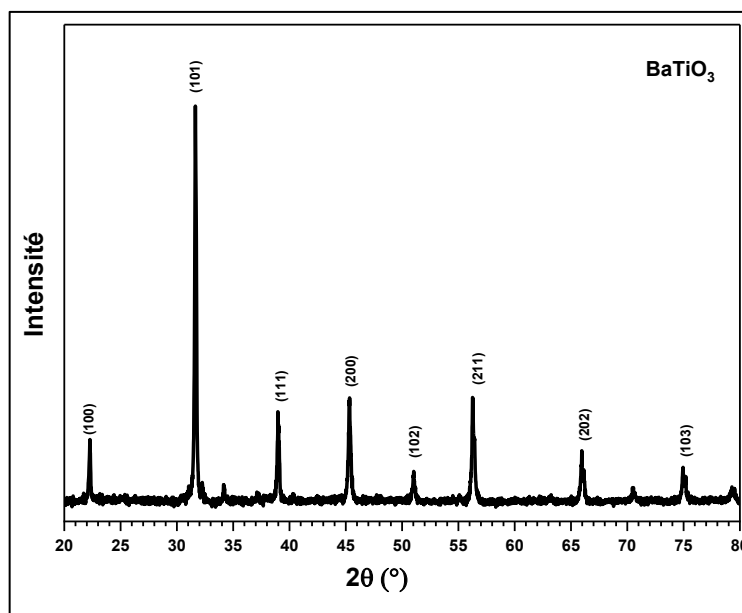
## 8 Résultats

### 8.1 Caractérisation du composés BaTiO<sub>3</sub> synthétisées par la méthode hydrothermal assistée par microonde.

#### 8.1.1 Diffraction des rayons X (XRD)

La formation des phases des échantillons a été étudiée par diffraction des rayons X, comme montré dans la figure 15. Les résultats montrent que les pics observés correspondent bien à ceux du BaTiO<sub>3</sub> pur, avec une prédominance de la phase tétragonale (T) unique (Crystallography Open Database No. 152-2128).

Selon la loi de Bragg, les pics de réflexion sont indexés avec des indices de Miller aux positions (1 0 0), (1 0 1), (1 1 1), (2 0 0), (4 0 0), (1 0 2), (2 1 1), (2 0 2), et (1 0 3). Tous les échantillons montrent une structure Tétragonal dans le groupe d'espace P4mm.



**Figure 15 :** spectre de DRX pour BaTiO<sub>3</sub> synthétisées par la méthode hydrothermale assistée par microonde.

Les paramètres structuraux, y compris la taille des cristallites (D), les paramètres de maille du réseau et la micro-déformation (%), ont été calculés à partir des données de XRD, qui sont présentées dans les tableaux 1. Le raffinement de Rietveld a été réalisé à l'aide du logiciel MAUD, facilitant un affinage précis de tous les paramètres structuraux. Ces paramètres incluent les paramètres du réseau, la taille des cristallites. L'affinage a été effectué pour obtenir une compréhension approfondie de la structure cristalline, assurant une représentation précise des

propriétés du matériau. Cet affinage approfondi offre des informations précieuses sur les effets des conditions de synthèse variables sur les caractéristiques structurales.



**Figure 16 :** Diagramme de diffraction des rayons X (XRD) du composé BaTiO<sub>3</sub>

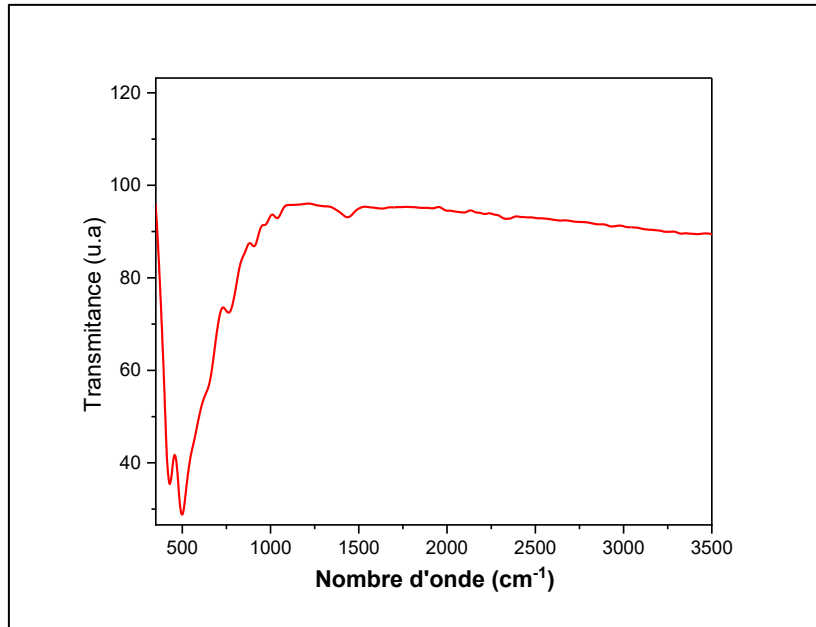
**Tableau 5 :** Spectre de DRX affiné par Rietveld pour BaTiO<sub>3</sub>.

BaTiO <sub>3</sub>									
sig= 1.15	N°	Parameters de la cellule						Parameters cristallins	
		a(A°)	b(A°)	c(A°)	α(A°)	β(A°)	γ(A°)	Taille cristallite (nm)	Constraint
BaTiO <sub>3</sub>	152-2129	4.0103	4.0103	4.0052	90	90	90	128,7	2.124.10 <sup>-6</sup>
Tetragonal P 4 m m									

### 8.1.2 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR)

Les spectres FT-IR du composé BaTiO<sub>3</sub> synthétisées par la méthode hydrothermal assistée par microonde, obtenus sur une plage d'analyse de 380 à 4000 cm<sup>-1</sup>, montrent que chaque fréquence absorbée correspond à un mode vibratoire spécifique associé à un type de liaison particulier dans la structure cristalline. Les spectres des perovskites BaTiO<sub>3</sub>, représentés

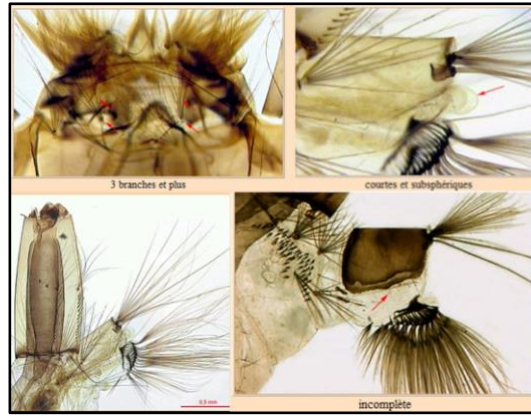
dans la figure 17, exhibent un modèle similaire, mais avec des variations notables dans l'intensité des pics et de légers décalages de certaines bandes caractéristiques. Ces bandes, situées dans la plage d'absorption de 400 à 600  $\text{cm}^{-1}$ , sont liées aux vibrations de tension des liaisons Me-O-Me, O-Me-O, et Me-O présentes dans les octaèdres et tétraèdres formant la structure de type perovskite .



**Figure 17 :** Les spectres de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) de BaTiO<sub>3</sub> synthétisées par la méthode hydrothermale assistée par microonde.

## 8.2 Identification morphologique de l'espèce étudiée

À l'aide du logiciel d'identification des moustiques (Brunhes et *al.*,1999), l'examen morphologique des spécimens collectés dans les zones humides côtières a permis de confirmer leur appartenance à l'espèce *Aedes detritus* (famille des Culicidae), espèce halophile fréquemment observée dans les marais salés et lagunes d'Afrique du Nord.



**Figure 18** : identification histologique.

### 8.3 Effets larvicides du BaTiO<sub>3</sub> sur A.detritus

#### 8.3.1 Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet larvicide de BaTiO<sub>3</sub>

L'analyse de l'ANOVA à permet d'évaluer l'effet larvicide de BaTiO<sub>3</sub> sur les larves.

##### ➤ Après 24 heures d'exposition

**Tableau 6:**Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) après 24 h d'exposition.

	Source de variation	df	Moyenne des carrés	F	Sig.
Entre groupes	481,526	3	160,509	180,121	0,000
Intragroupes	7,129	8	,891		
Total	488,655	11			

L'ANOVA met en évidence une différence hautement significative entre les groupes (  $p < 0,001$ ),confirmant que la concentration est un facteur déterminant de la mortalité larvaire après 24 heures d'exposition.

##### ➤ Après 48 heures d'exposition

**Tableau 7:**Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) après 48 h d'exposition.

	Source de variance	df	Moyenne des carrées	F	Sig.
Entre groupes	1200,042	3	400,014	26,460	,000
Intragroupes	120,939	8	15,117		
Total	1320,982	11			

Les résultats de l'ANOVA révèlent une différence significative entre les groupes ( $p < 0,001$ ), montrant que l'exposition prolongée renforce l'effet du BaTiO<sub>3</sub> sur la mortalité larvaire après 48 hr .

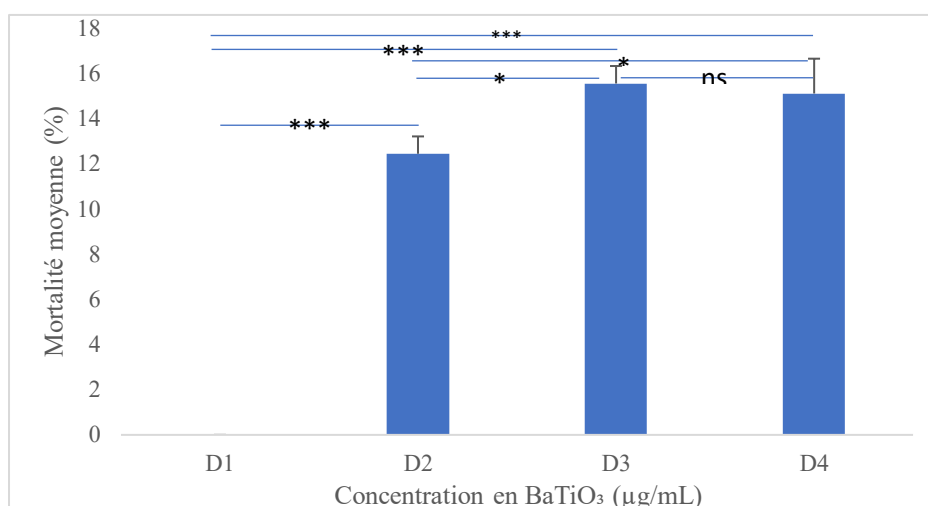
➤ **Après 72 heures d'exposition**

**Tableau 8 :** Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) après 72 h d'exposition.

	Source de variance	df	Moyenne des carrées	F	Sig.
Entre groupes	2804,670	3	934,890	112,992	,000
Intragroupes	66,192	8	8,274		
Total	2870,862	11			

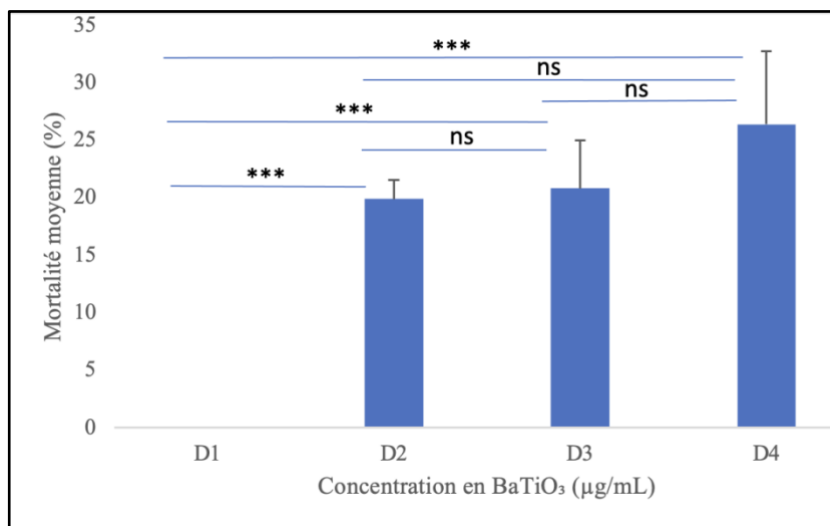
L'analyse ANOVA confirme une très forte différence entre les groupes ( $p < 0,001$ ), mettant en évidence un effet dose-réponse significatif à long terme après 72 h.

### 8.3.2 Test Tukey



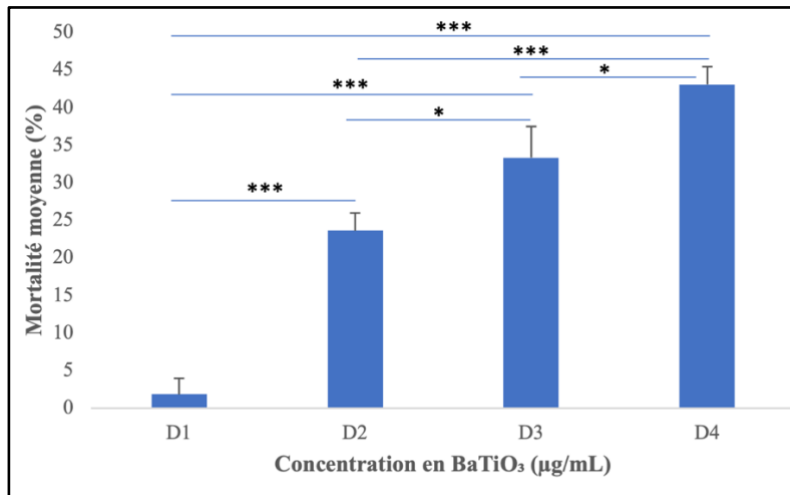
**Figure 19 :** Effet des concentrations de BaTiO<sub>3</sub> sur la mortalité moyenne des larves d'*Aedes detritus* après 24 heures d'exposition.

Test de Tukey post-ANOVA de la mortalité moyenne des larves d'*Aedes detritus* après 24 heures d'exposition à différentes concentrations de nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub> (D1 = 100 µg/mL, D2 = 300 µg/mL, D3 = 400 µg/mL, D4 = 500 µg/mL), figure 19. L'analyse révèle une augmentation significative de la mortalité dès 300 µg/mL, avec des différences hautement significatives entre D1 et D2, D3 et D4 (\*\*), traduisant un effet toxique clair dès les premières 24 heures. Une différence significative est également notée entre D2 et D3 (\*), indiquant une progression dose-dépendante. En revanche, aucune différence significative n'est observée entre D3 et D4 (ns), suggérant un effet plateau à partir de 400 µg/mL. Ces résultats montrent que les nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub> induisent une mortalité rapide et dose-dépendante chez les larves, avec un seuil d'efficacité atteint dès 300 µg/mL et une stabilisation de l'effet létal au-delà de 400 µg/mL, possiblement liée à la saturation des mécanismes d'action toxique ou à une réponse adaptative des larves.



**Figure 20:** Effet des concentrations de BaTiO<sub>3</sub> sur la mortalité moyenne des larves d'*Aedes detritus* après 48 heures d'exposition.

L'histogramme présente la mortalité moyenne des larves d'*Aedes detritus* exposées à différentes concentrations de BaTiO<sub>3</sub> (100, 300, 400 et 500 µg/mL) après 48 heures, accompagnée de l'analyse statistique post-ANOVA par le test de Tukey. Ce dernier révèle que la mortalité enregistrée à 300, 400 et 500 µg/mL est hautement significative par rapport à celle observée à 100 µg/mL ( $p < 0,001$ ), traduisant un effet toxique clair dès 300 µg/mL. En revanche, les comparaisons entre les groupes D2, D3 et D4 ne montrent aucune différence significative (ns), malgré une légère augmentation visuelle de la mortalité à mesure que la concentration augmente. Cette absence de différence statistique entre les doses les plus élevées indique l'existence d'un effet plateau, suggérant que l'augmentation de la concentration au-delà de 300 µg/mL n'accroît pas significativement l'effet létal. Ainsi, l'analyse de Tukey confirme que 300 µg/mL constituent une dose seuil efficace, au-delà de laquelle la toxicité se stabilise probablement en raison de la saturation des mécanismes physiologiques ciblés chez les larves.

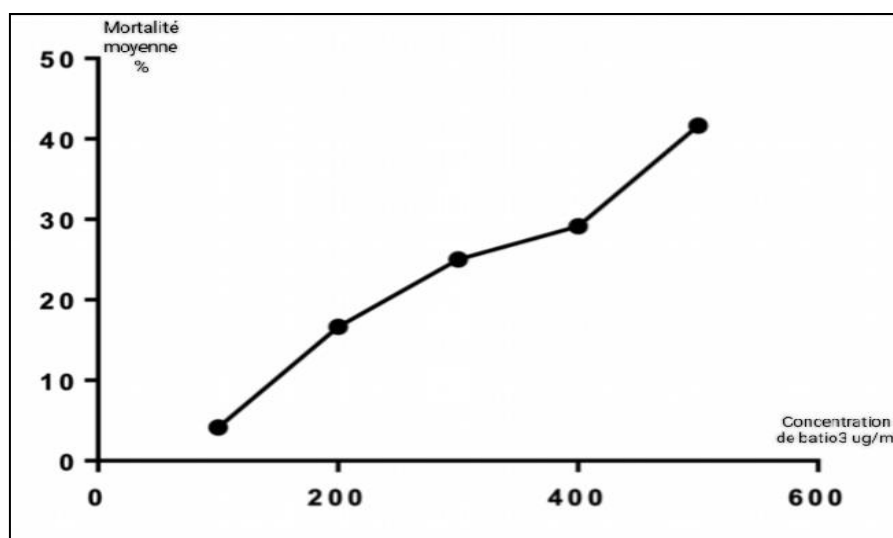


**Figure 21** : Effet des concentrations de BaTiO<sub>3</sub> sur la mortalité moyenne des larves d'*Aedes detritus* après 72 heures d'exposition.

L'histogramme illustre la mortalité moyenne des larves d'*A. detritus* après 72 heures d'exposition à différentes concentrations de BaTiO<sub>3</sub> (D1 = 100 µg/mL, D2 = 300 µg/mL, D3 = 400 µg/mL, D4 = 500 µg/mL), avec les écarts-types représentés par les barres d'erreur. L'analyse post-ANOVA, appuyée par le test de Tukey, montre une augmentation significative de la mortalité entre D1 et les autres doses (D2, D3, D4), toutes statistiquement très significatives ( $p < 0,001$ ), indiquant que les nanoparticules induisent un effet toxique marqué dès 300 µg/mL après 72 heures. De plus, des différences significatives sont observées entre D2 et D3 ( $p < 0,05$ ), puis entre D2 et D4 ( $p < 0,01$ ), ce qui révèle une progression claire et dose-dépendante de la mortalité au fil de l'exposition prolongée. En revanche, aucune différence significative n'est observée entre D3 et D4 (ns), ce qui suggère qu'un seuil maximal d'efficacité larvicide est atteint à partir de 400 µg/mL, traduisant un effet plateau. Ainsi, cet histogramme met en évidence que les nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub> provoquent une mortalité croissante et significative en fonction de la dose et du temps, avec une efficacité maximale atteinte entre 400 et 500 µg/mL après 72 h.

L'ensemble des résultats statistiques (ANOVA et Tukey) et graphiques obtenus confirme une toxicité croissante des nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub> vis-à-vis des larves d'*Aedes detritus*. L'effet observé est significatif dès 300 µg/mL, et devient progressivement plus marqué au fil du temps, en particulier à 72 h, où l'absence d'effet plateau suggère une action cumulative des nanoparticules. Cette tendance dose-dépendante est conforme à une cinétique d'accumulation ou d'action différée, typique des substances peu solubles et à relargage lent.

### 8.3.3 Modélisation dose-réponse

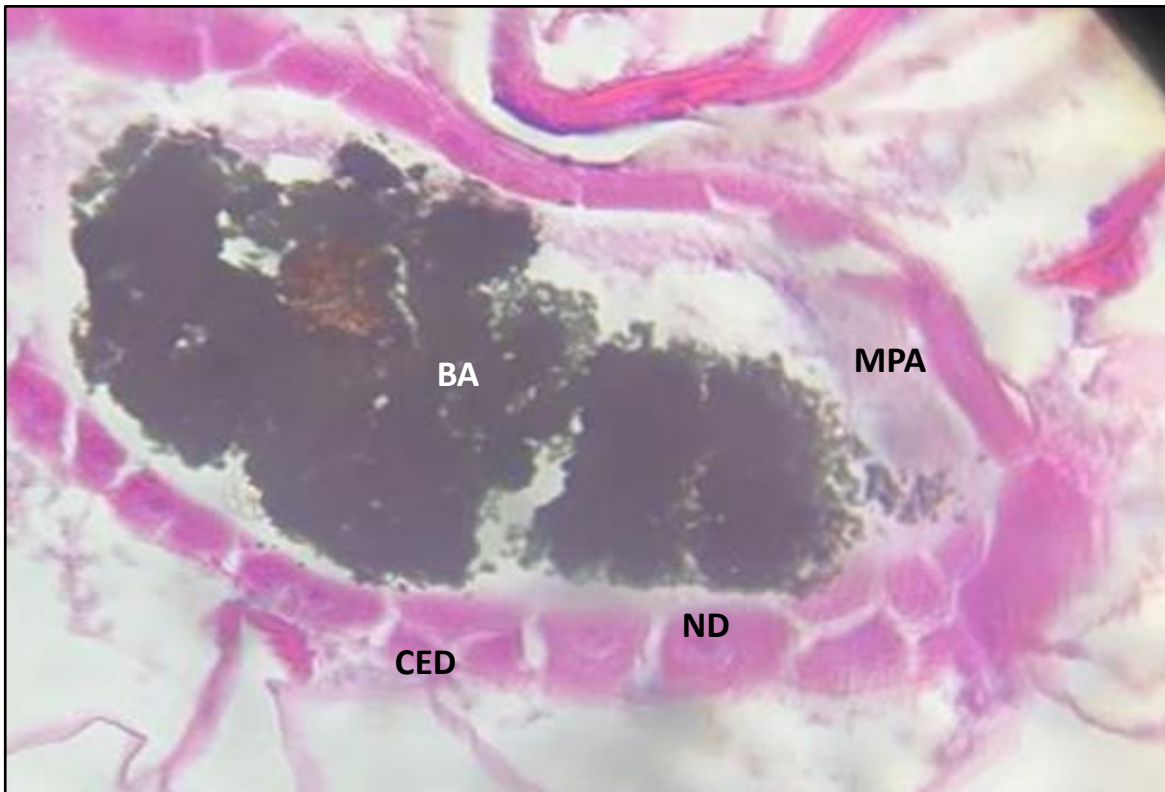


**Figure 22 :** Courbe dose-réponse sigmoïdale de la mortalité larvaire à 72 h.

L'analyse de la courbe dose-réponse sigmoïdale obtenue après 72 heures d'exposition met en évidence une relation claire entre l'augmentation des concentrations de nanoparticules de BaTiO<sub>3</sub> et la mortalité des larves d'*Aedes detritus*, traduisant un effet toxique progressif et cumulatif. Les valeurs estimées de CL25 (311,9 µg/mL), CL50 (658,1 µg/mL) et CL90 (2930 µg/mL) révèlent une toxicité modérée mais prolongée, attribuable aux propriétés physico-chimiques du BaTiO<sub>3</sub> telles que sa faible solubilité, sa stabilité cristalline et sa capacité d'interaction lente avec les tissus larvaires, via des mécanismes tels que l'adsorption cellulaire ou l'induction de stress oxydatif (Benziada, 2018 ; Fayol et al., 2012 ; Kahru & Dubourguier, 2010). Ce mode d'action progressif diffère de celui de nanoparticules plus agressives comme l'argent ou le ZnO, connues pour leur toxicité aiguë rapide (Ghosh et al., 2013 ; Ajeet et al., 2016), et positionne le BaTiO<sub>3</sub> comme une alternative prometteuse pour la lutte antivectorielle durable. Les effets plateau observés à fortes concentrations indiquent une saturation des mécanismes physiologiques larvaires, tandis que les observations histologiques appuient l'hypothèse d'une altération tissulaire progressive, confirmant l'effet différé du BaTiO<sub>3</sub> (Khair, 2021 ; Selvaraj et al., 2021). Ainsi, ce profil d'action cumulé et sélectif, associé à un risque réduit pour les espèces non cibles, confère au BaTiO<sub>3</sub> un intérêt écologique majeur, à condition que son impact environnemental à long terme soit rigoureusement évalué (Lenntech, 2025 ; Barik et al., 2018).

En résumé, l'ensemble des paramètres extraits des courbes sigmoïdales confirme que le BaTiO<sub>3</sub> exerce une toxicité différée, efficace à moyen terme, et quantitativement modulable, ce qui soutient son potentiel comme alternative écologique aux insecticides conventionnels.

## 8.4 Étude histologique



**Figure 23 :** Photomicrographie d'une coupe transversale du mésentéron de larves de troisième stade d'*Aedes detritus* traitées avec la CL50 de nanoparticules (NPs) de BaTiO<sub>3</sub> après 72 heures d'exposition. (Gx400). Cellules épithéliales en dégradation (CED), Membrane péritrophique altérée (MPA), Noyau dégénéré (ND), Bole alimentaire (BA)

La photomicrographie révèle des altérations histopathologiques significatives dans le mésentéron des larves traitées, comparé à un groupe témoin (non montré ici). Les effets notables incluent :

- **Dégradation des microvillosités** (perturbation de l'absorption des nutriments).
- **Nécrose des cellules épithéliales** (déformation ou lyse cellulaire).
- **Rupture de la membrane péritrophique** (perte de protection mécanique et chimique).
- **Condensation ou fragmentation des noyaux** (signes d'apoptose ou de stress toxique).
- Stagnation du bolus : Ralentissement de la digestion dû aux dommages épithéliaux.
- Dégradation de la membrane péritrophique : Le bolus entre en contact direct avec les cellules endommagées, aggravant les lésions.
- Possibles résidus de NPs : Accumulation de nanoparticules dans le bolus, contribuant à la toxicité locale.

### III.2. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent une toxicité significative des nanoparticules de Titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) sur les larves d'*A. detritus*, suivant un schéma clairement dose-dépendant et temporellement progressif. La mortalité observée à 72 h d'exposition atteint jusqu'à 43,05 % à 500  $\mu\text{g/mL}$ , avec une  $\text{CL}_{50}$  estimée à 658,1  $\mu\text{g/mL}$  ( $\text{IC}_{95} \% : 495,4 - 874,2 \mu\text{g/mL}$ ) et une  $\text{CL}_{90}$  atteignant 2930  $\mu\text{g/mL}$ . Ces données traduisent une toxicité modérée mais persistante, confirmée par l'analyse ANOVA à 72 h, qui met en évidence un effet significatif du facteur concentration.

Comparativement à d'autres types de nanoparticules, le  $\text{BaTiO}_3$  présente une toxicité plus lente mais prolongée. Ghosh et al. (2013) ont rapporté une  $\text{CL}_{50}$  de seulement 5,8  $\mu\text{g/mL}$  pour les nanoparticules d'argent (AgNPs) contre *Culex quinquefasciatus*, ce qui témoigne d'une action beaucoup plus rapide mais également plus brutale. De même, Ajeet et al. (2016) ont observé une mortalité de 70 % à 24 h avec le ZnO, soulignant un stress oxydatif massif. En revanche, notre étude montre que le  $\text{BaTiO}_3$  n'induit pas de mortalité significative à 24 h pour les faibles doses ( $<300 \mu\text{g/mL}$ ), ce qui s'explique par ses propriétés physico-chimiques : faible solubilité, stabilité cristalline et absence de relargage d'ions métalliques toxiques (Selvaraj et al., 2021).

Cette latence d'action est en accord avec l'hypothèse d'un effet cumulatif, probablement médié par l'adsorption progressive des nanoparticules sur les tissus larvaires, suivie de la génération de ROS (espèces réactives de l'oxygène), comme l'ont suggéré Benelli et al. (2015). Les dommages induits incluent la peroxydation lipidique, les lésions de l'ADN, et les altérations enzymatiques (SOD, catalase). De plus, les propriétés piézoélectriques uniques du  $\text{BaTiO}_3$  permettent d'envisager des perturbations électrophysiologiques au niveau des membranes cellulaires larvaires, ce qui constitue un mécanisme toxique original, rarement exploré dans la littérature entomologique (Khair, 2021).

L'étude histologique réalisée en parallèle confirme ces hypothèses mécanistiques : les coupes observées à l'hématoxyline-éosine montrent une désorganisation tissulaire nette, avec des altérations des cellules digestives, des vacuolisations cytoplasmiques, et des ruptures de l'intégrité intestinale. Ces lésions sont comparables à celles observées chez *Chironomus riparius* exposé au ZnO, comme le rapporte Kahru & Dubourguier (2010).

Contrairement au  $\text{TiO}_2$ , souvent jugé peu toxique en conditions standard, mais actif sous UV par photoréaction (Barik *et al.*, 2018), le  $\text{BaTiO}_3$  pourrait également manifester une phototoxicité en milieux exposés à la lumière naturelle, ce qui ouvre de nouvelles pistes d'investigation. Cela dit, la sélectivité du  $\text{BaTiO}_3$  vis-à-vis des espèces non cibles, due à son action différée, est un avantage majeur pour des écosystèmes sensibles, comme le soulignent Messing *et al.* (1993).

Cependant, l'efficacité relativement élevée du  $\text{BaTiO}_3$  à forte concentration ( $\text{CL}_{90} = 2930 \mu\text{g/mL}$ ) invite à une optimisation des formulations, notamment par encapsulation dans des polymères biodégradables à libération contrôlée, comme proposé par Ghosh *et al.* (2013). Cette approche permettrait de prolonger l'action larvicide tout en minimisant les doses utilisées.

Enfin, bien que les résultats soient prometteurs, la persistance environnementale du  $\text{BaTiO}_3$  pose question. Sa faible biodégradabilité et son accumulation potentielle dans les sédiments soulignent la nécessité d'études de toxicité chronique sur d'autres espèces aquatiques (*Daphnia*, poissons) (Lenntech, 2025). Une telle évaluation est indispensable pour garantir une utilisation écologiquement responsable de cette technologie émergente.

---

# Conclusion

---

## Conclusion

Ce travail de recherche a permis d'explorer le potentiel des nanoparticules de Titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) comme agent larvicide contre les moustiques *Aedes detritus*, un vecteur d'importance médicale. Les résultats obtenus ont mis en évidence une toxicité clairement dose-dépendante et temporellement progressive, marquée par une  $\text{CL}_{50}$  de 658,1  $\mu\text{g/mL}$  et une  $\text{CL}_{90}$  de 2930  $\mu\text{g/mL}$  après 72 heures d'exposition. Ces données soulignent l'efficacité différée mais significative du  $\text{BaTiO}_3$ , avec un effet maximal atteint à des concentrations élevées, et une action cumulative favorable dans le cadre d'une lutte à long terme.

Comparativement à d'autres nanoparticules comme l'argent ou le  $\text{ZnO}$ , le  $\text{BaTiO}_3$  présente une toxicité modérée, ce qui pourrait constituer un avantage écologique en minimisant les risques pour les espèces non cibles. De plus, ses propriétés piézoélectriques et sa stabilité cristalline confèrent à cette nanoparticule un mécanisme d'action unique, encore peu étudié en lutte antivectorielle, mais prometteur.

Toutefois, la faible solubilité du  $\text{BaTiO}_3$  et son potentiel de persistance environnementale soulèvent la nécessité d'une évaluation écotoxicologique plus poussée, notamment en conditions naturelles. Les observations histologiques, les résultats de l'analyse statistique (ANOVA, Tukey) et la modélisation log-dose renforcent la validité des résultats obtenus.

Ainsi, cette étude pose les bases d'une alternative durable aux insecticides classiques, en s'inscrivant dans une approche moderne, fondée sur la nanotechnologie et le respect des équilibres écologiques. Des recherches futures devraient être menées pour optimiser la formulation, évaluer les effets chroniques et valider les résultats en conditions semi-naturelles, afin de garantir une application sûre et efficace du  $\text{BaTiO}_3$  dans la lutte antivectorielle intégrée.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ajeet, K., Ritu, S., & Alok, K.** (2016). *Toxicity of zinc oxide nanoparticles against mosquito larvae: A short review*. *Journal of Bionanoscience*, 10(3), 1–8.
- Alto, B. W., & Juliano, S. A.** (2001). Precipitation and temperature effects on populations of *Aedes albopictus*. *Journal of Medical Entomology*, 38(4), 646–656.
- Asloum, M.** (2023). *Étude morphologique des Culicidés en région méditerranéenne*. Université d'Alger, 1-6.
- Bagny, L.** (2009). *Écologie des moustiques dans les zones urbaines tropicales*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 6-7.
- Barik, T. K., Sahu, B., & Swain, V.** (2018). Nanotechnology-based insecticides and their impact on environment. *Applied Nanoscience*, 8(5), 1021–1030.
- Becker, N., Petrić, D., Zgomba, M., Boase, C., Madon, M., Dahl, C., & Kaiser, A.** (2010). *Mosquitoes and their control*. Springer Science & Business Media.
- Benelli, G., Mehlhorn, H., & Canale, A.** (2015). Mosquito control with green synthesized nanoparticles: Towards the one health approach. *Parasitology Research*, 114(6), 2201–2211.
- Benziada, S.** (2018). *Caractérisation du titanate de baryum et ses applications en biocéramique*. Université de Constantine. 10
- Boyer, S.** (2006). Résistance aux insecticides chez les moustiques : mécanismes et surveillance. *Cahiers Agricultures*, 15(6), 509–515.
- Brunhes, J., Rhaim, A., Geoffroy, B., Hervy, J. P., & Guillevin, P.** (1999). *Logiciel d'identification des moustiques d'Afrique Méditerranéenne*. Institut de Recherche pour le Développement.
- Carrière, M.** (2012). Interaction des nanoparticules avec les cellules humaines. *Médecine/Sciences*, 28(3), 239–244.
- Cassida, J. E., & Quistad, G. B.** (1998). *Insecticides with novel modes of action: Mechanisms and application*. Springer, 1-16.
- Clements, A. N.** (2000). *The Biology of Mosquitoes. Volume 1: Development, Nutrition and Reproduction*. Chapman & Hall, 1-588.
- Clements, A. N.** (2012). *The Biology of Mosquitoes. Volume 3: Transmissions and Vector Control*. CABI Publishing, 1-800
- Damjanovic, D.** (1998). Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. *Reports on Progress in Physics*, 61(9), 1267–1324.
- Denlinger, D. L., & Armbruster, P. A.** (2014). Mosquito diapause. *Annual Review of*

*Entomology*, 59, 73–93.

**Doshi, M., Patel, S., & Kumar, R.** (2020). Green synthesis of nanoparticles for vector control. *Journal of Vector Ecology*, 45(2), 121–128.

**Dupont, J., & Martin, P.** (2007). Bioproduction des nanoparticules par *Lactobacillus* sp. *Revue de Microbiologie Industrielle*, 34(2), 87–92.

**ECDC (European Centre for Disease Prevention and Control).** (2023). *Aedes detritus – Factsheet for experts*. Retrieved from <https://www.ecdc.europa.eu>

**Fayol, D., Lartigue, L., & Carrière, M.** (2012). Interactions des nanoparticules avec les cellules humaines. *Médecine/Sciences*, 28(3), 239–244.

**Gavi.** (2024). *La dengue : profil mondial et efforts de vaccination*. <https://www.gavi.org>

**Ghosh, A., Chowdhury, N., & Chandra, G.** (2013). Plant extracts as potential mosquito larvicides. *Indian Journal of Medical Research*, 137(5), 681–698.

**Guégan, J. F., & Mouchet, J.** (2001). *La biodiversité des agents infectieux*. IRD Éditions.

**Haldiday, A. H.** (1833). On the classification of insects in the order Diptera. *Entomological Magazine*, 1, 145–152.

**Harwood, R. F., & James, M. T.** (1979). *Entomology in Human and Animal Health*. Macmillan Publishing Co, 548.

**Hassaïne, M., Arroussi, R., & Metge, G.** (2015). Contribution à l'étude des moustiques (Diptera, Culicidae) de la région côtière Est de l'Algérie. *Bulletin de la Société Entomologique de France*, 120(2), 165–174.

**INRS.** (2024). *Nanomatériaux : guide d'évaluation des risques*. Institut National de Recherche et de Sécurité.

**Isman, M. B.** (2015). A renaissance for botanical insecticides? *Pest Management Science*, 71(12), 1587–1590.

**Jaffe, B., Cook, W. R., & Jaffe, H.** (1971). *Piezoelectric Ceramics*. Academic Press.

**Kahru, A., & Dubourguier, H. C.** (2010). From ecotoxicology to nanoecotoxicology. *Toxicology*, 269(2-3), 105–119.

**Khair, A.** (2021). Piézoélectricité et applications biologiques du BaTiO<sub>3</sub>. *Journal of Advanced Ceramics*, 10(3), 55–62.

**Kittel, C.** (2023). *Introduction to Solid State Physics* (9th ed.). Wiley.

**Lartigue, L., Fayol, D., & Carrière, M.** (2012). *Les nanoparticules : interactions et impacts*. INSERM.

**Legros, M.** (2014). *Les moustiques et la santé publique*. Paris: Éditions Santé.

**Lines, M. E., & Glass, A. M.** (2001). *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related*

*Materials*. Oxford University Press, 680–694.

**Lounibos, L. P.** (2002). Invasions by insect vectors of human disease. *Annual Review of Entomology*, 47, 233–266.

**Matalssi, M., & Ghazzal, M.** (2020). Biosynthèse des nanoparticules de ZnO et activité larvicide. *Moroccan Journal of Chemistry*, 8(2), 345–352.

**Medlock, J. M., Avenell, D., Barrass, I., & Leach, S.** (2006). Analysis of the potential for survival and establishment of *Aedes albopictus* in the UK. *Journal of Vector Ecology*, 31(2), 292–304.

**Messina, J. P., Brady, O. J., Pigott, D. M., Golding, N., Kraemer, M. U., Scott, T. W., & Hay, S. I.** (2019). Global spread of dengue virus types. *Nature Microbiology*, 4(7), 1048–1057.

**Messing, G. L., Markovic, V., & Poter, L.** (1993). *Synthesis of ceramic powders by molten salt methods*. *Journal of the American Ceramic Society*, 76(4), 937–943.

**Mordecai, E. A., Ryan, S. J., Caldwell, J. M., Shah, M. M., & LaBeaud, A. D.** (2019). Climate change and mosquito-borne disease risk. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 13(5), e0007213.

**Novethic.** (2024). *Les nanoparticules et leurs propriétés physico-chimiques*. <https://www.novethic.fr>

**Obeizi, N.** (2023). *Effet des nanoparticules sur les larves de moustiques : Revue critique*. *Revue Africaine d'Environnement*, 15(1), 44–56.

**Patel, D., Mehta, N., & Desai, M.** (2023). Biosensors for vector surveillance using nanomaterials. *Nanotechnology in Biosensors*, 24(3), 201–217.

**Rachid Arroussi, R., Hassaïne, M., & Metge, G.** (2021). Étude bioécologique d'*Aedes detritus* dans les zones marécageuses d'Algérie. *Revue Algérienne d'Entomologie Médicale*, 7(1), 12–20.

**Reinhold, J. M., Lazzari, C. R., & Lahondère, C.** (2018). Effects of the environmental temperature on the life history traits of *Aedes aegypti*. *PLOS ONE*, 13(11), e0207413.

**Riman, R. E., Suchanek, W. L., & Dickey, E. C.** (1996). Molten salt synthesis of perovskite oxides. *Solid State Ionics*, 86–88, 21–28.

**Robert, V., & Hervy, J. P.** (2000). *Les moustiques d'importance médicale*. IRD Éditions.

**Schaffner, F., Angel, G., Geoffroy, B., & Hervy, J. P.** (2001). *Les moustiques d'Europe : Identification et répartition des espèces*. IRD Éditions, 548.

**Selvaraj, S., Sundaram, V. M., & Mahalingam, S.** (2021). BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles: Synthesis, properties and eco-toxicological evaluation. *NanoImpact*, 21, 100302.

**Singh, A., & Sultana, R.** (2023). Larvicidal potential of metal nanoparticles synthesized by

green routes. *Entomological Research*, 53(1), 45–54.

**Snow, K., & Medlock, J. M.** (2006). Potential for *Aedes detritus* as vector of human pathogens. *Journal of Vector Ecology*, 31(2), 276–281.

**Soltani, N.** (2015). *Les insectes vecteurs de maladies humaines en Algérie*. Éditions Universitaires.

**Takken, W., & Verhulst, N. O.** (2013). Host preferences of blood-feeding mosquitoes. *Annual Review of Entomology*, 58, 433–453.

**Toma, L., Severini, F., Di Luca, M., Bella, A., & Romi, R.** (2011). Insecticide resistance in Italian populations of *Aedes albopictus*. *Medical and Veterinary Entomology*, 25(3), 239–247.

**Vidal, P.** (2023). *Les arboviroses émergentes : contexte, diagnostic et prévention*. *Revue Française de Médecine Tropicale*, 63(2), 102–109.

WHO (World Health Organization). (2017). *Vector-borne diseases*. <https://www.who.int>

WHO (World Health Organization). (2020). *World Malaria Report 2020*. Geneva.

WHO (World Health Organization). (2024). *World Malaria Report 2024*. Geneva.

**Xu, Y., Shen, Y., & Zhang, Q.** (2015). Synthesis of BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles and their electrical properties. *Materials Research Bulletin*, 70, 445–452.

**Zhou, D., & Snyder, R. L.** (1991). Molten salt synthesis of barium titanate. *Journal of Materials Research*, 6(5), 1083–1086.